

## 제약조건 처리기법에 따른 하모니써치 알고리즘의 효율성 평가 : 관로 최소비용설계 문제의 적용

유도근<sup>1</sup>, 이호민<sup>2</sup>, 이의훈<sup>2</sup>, 김종훈<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 방재과학기술연구소, <sup>2</sup>고려대학교 건축사회환경공학부

## Efficiency Evaluation of Harmony Search Algorithm according to Constraint Handling Techniques : Application to Optimal Pipe Size Design Problem

Yoo, Do Guen<sup>1</sup>, Lee, Ho Min<sup>2</sup>, Lee, Eui Hoon<sup>2</sup>, Kim, Joong Hoon<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University

<sup>2</sup>School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

**요약** 제약조건이 있는 공학 최적화 문제에서 보다 좋은 결과를 얻기 위해서는 효율적인 제약조건 처리기법의 적용은 필수적이다. 본 연구에서는 네 가지의 제약조건 처리기법을 적용하여 메타휴리스틱 최적화 기법으로 널리 사용되고 있는 Harmony Search 알고리즘의 최적화 효율성을 평가하였다. 평가를 위해 대표적인 이산형 최적화 문제 중 하나인 상수관로 최소비용설계 문제를 적용하였다. 적용결과 전통적인 제약조건 처리방법으로 사용되던 벌칙함수에 비해 제안된 제약조건 처리기법의 결과가 효율적임을 확인하였다. 특히,  $\epsilon$ -Constrained Method의 경우 기존방법에 비하여 효율적이고 안정적인 결과를 도출하였다. 제안된 방법은 새로운 최적화 알고리즘의 개발 필요 없이 HS의 성능을 증가시킬 수 있다는 점에서 의의가 있다고 판단된다. 또한 400개 이상의 결정변수를 가지는 대규모 문제의 적용을 통하여, 제안된 방법이 대규모 공학 최적화 문제에서도 활용이 가능함을 확인하였다.

**Abstract** The application of efficient constraint handling technique is fundamental method to find better solutions in engineering optimization problems with constraints. In this research four of constraint handling techniques are used with a meta-heuristic optimization method, harmony search algorithm, and the efficiency of algorithm is evaluated. The sample problem for evaluation of effectiveness is one of the typical discrete problems, optimal pipe size design problem of water distribution system. The result shows the suggested constraint handling technique derives better solutions than classical constraint handling technique with penalty function. Especially, the case of  $\epsilon$ -constrained method derives solutions with efficiency and stability. This technique is meaningful method for improvement of harmony search algorithm without the need for development of new algorithm. In addition, the applicability of suggested method for large scale engineering optimization problems is verified with application of constraint handling technique to big size problem has over 400 of decision variables.

**Keywords** : Constraint Handling Technique, Harmony Search Algorithm, Optimal Pipe Size Design

---

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.  
(NRF-2013R1A2A1A01013886).

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

Tel: +82-2-3290-3316 email: jaykim@korea.ac.kr

Received March 11, 2015

Revised (1st March 31, 2015, 2nd April 13, 2015)

Accepted July 16, 2015

Published July 31, 2015

## 1. 서론

가장 널리 알려진 메타휴리스틱 기법의 하나인 Genetic Algorithm [1]이 처음 소개된 이후, 자연현상, 인간의 행동 및 물리적 현상을 모방한 Tabu Search [2], Simulated Annealing [3], Ant Colony Optimization [4], Particle Swarm Optimization [5], 그리고 Differential Evolution [6] 등이 개발되었다. 2000년대에도 2001년 Harmony Search [7-8] 알고리즘이 개발된 바 있으며, 그 후 Honeybee Algorithm [9], Firefly Algorithm [10], Cuckoo Search [11], Bat Algorithm [12], Water Cycle Algorithm [13], Mine Blast Algorithm [14] 등과 같은 다수의 메타휴리스틱 알고리즘이 새롭게 개발되었다. 각 알고리즘은 알고리즘 자체의 개량을 통해 지속적으로 개선되어 왔으며, 최근에는 다른 메타휴리스틱 알고리즘간의 결합이나 다른 수학적 기반을 둔 알고리즘과의 결합을 통해 활발한 개선이 이루어지고 있다. 이와 같은 최적화 기법의 효율성은 각 방법론에서 사용되는 매개변수의 특성 및 알고리즘의 구조에 따라 다르게 나타난다. 따라서 최적화 효율성을 증대시키기 위해서는 각 최적화 기법에 대한 높은 이해도와 숙련된 적용기술이 필요하다.

특히 제약조건이 있는 공학 최적화 문제에서 보다 좋은 결과를 얻기 위해서는 메타휴리스틱 기법에서의 효율적인 제약조건 처리기법의 적용은 필수적이다. Michalewicz [15]는 진화알고리즘에 기반을 둔 제약조건 처리기법을 정리하여 제시한바 있으며, Deb and Agrawal [16]과 Deb [17]은 진화 알고리즘 중 Genetic Algorithm 최적화 과정 중에 활용 가능한 제약조건 처리기법을 제안하여 제시하였다. 이 방법은 Genetic Algorithm에서 새롭게 생성되는 자식해의 우열을 제약조건을 추가적으로 고려하여 결정한다. 이와 같은 제약조건 처리방법에 관한 연구는 대부분의 연구들이 Genetic Algorithm과 Differential Evolution에 집중되어 연구 [15-28]되어, 상대적으로 다른 메타휴리스틱 최적화 방법의 경우 제약조건 처리기법을 가장 기본적으로 전통적인 방법인 벌칙함수 (Penalty function)를 적용하는 것에 그치고 있다. 국내의 경우 일부 연구자들 [29-30]에 의해 연구가 수행되고 있지만, 대부분의 연구 [29-30]가 탐색의 양을 줄이기 위해 간접적인 해결 방안인 제약조건 완화기법을 사용하거나 특정 문제에만 적합한 제약조건 처리 방법을 사용하였다. 이는 메타휴리스틱 기법에 일반적인 방법으로 사용되지 못한다는 단점이 있다.

본 연구에서는 메타휴리스틱 최적화 기법으로 널리 사용되고 있는 Harmony Search (HS)의 최적화 효율성을 네 가지의 제약조건 처리기법을 적용하여 평가하고자 하였다. 현재까지 제약조건이 포함된 최적화 문제를 HS를 통해 해결하고자 하였을 경우, 대부분의 연구자들은 [7-8] 벌칙함수를 적용하여 최적해 결과를 획득한바 있다. 본 연구에서는 새로운 알고리즘의 개량이나 개발 없이 제약조건 기법의 변경을 통하여 효율적인 최적화 결과를 도출하고자 하였다. 제안된 제약조건 처리기법을 대표적인 이산형 최적화 문제의 하나인 상수관망 최적설계에 적용하여 그 결과를 비교 분석하였다.

## 2. Harmony Search

Harmony Search (HS)의 경우 연습과정을 통해 경험한 화음 중에서 좋았다고 생각되는 화음들을 모은 집합인 Harmony Memory (HM)를 이용하며, 동시에 좋은 화음을 HM에 저장하므로 저장 공간을 사용하여 과거 해를 보존한다. 초기해의 경우 특정 지역해에 국한되지 않도록 무작위로 생성하며, 한 번의 반복수행을 통해 하나의 이웃해를 생성하게 된다. HS는 기존의 발견적 탐색법인 SA (Simulated Annealing)와 TS (Tabu Search)와는 달리 군탐색을 수행하면서도, 과거의 경험을 축적하고 있다는 측면에서는 TS의 특징을 지니며, 또한 해가 꼭 최적이지 아니라도 어느 정도 좋은 범위에 들면 경험의 집합에 추가한다는 점에서 SA의 특징도 지니고 있는 탐색기법이다. 메타휴리스틱 알고리즘 중 널리 알려져 있는 Genetic Algorithm (GA)과 비교해보면, GA의 경우 새로운 해의 생성 시 오직 부모세대의 두 유전자만이 새로운 유전자에 영향을 주며 양 부모의 경험만이 새로운 유전자의 정보가 된다. 그러나 HS는 과거의 모든 화음으로부터 경험을 얻기 때문에(이전 iteration에서 얻은 좋은 해를 활용하기 때문에) 보다 풍부한 정보로부터 새로운 해를 얻게 된다 [31]. Harmony Search가 다른 알고리즘과 차이를 나타내는 가장 큰 특징은 탐험/탐색 (Exploration, Global Search)과 획득한 정보의 탐사/유효한 이용 (Exploitation, Local Search)의 조화에 있다. Table 1은 Harmony Search 알고리즘의 의사코드를 나타낸다.

Genetic Algorithm의 경우 두 부모해의 교배를 통해 (Crossover) 탐사/유효한 이용 과정을 수행하게 되며, 돌

연변이의 발생 (Mutation, 이진수의 변화 1↔0)을 통해 탐험/탐색 과정이 진행되게 된다. 즉, 탐사 과정과 탐험 과정이 각각의 독립적으로 수행된다. 그러나 Harmony Search의 경우 HMCR(Harmony Memory Considering Rate)을 이용하여 새로운 화음을 만들 때, HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어 낼 것인가 (탐사/유효한 이용) 아니면, 전체 정의영역에서 무작위로 만들어 낼 것인가 (탐험/탐색)하는 과정이 동시에 진행되며, PAR (Pitch Adjusting Rate)의 경우에도 음조 (Pitch)의 조정 범위 (bandwidth)에 따라 탐사과정과 탐험과정이 조화롭게 진행되는 독특한 특성을 지닌다.

Table 1. Pseudo code of HSA

<pre> begin Objective function <math>f(x)</math>, <math>x=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T</math> Generate initial harmonics (real number arrays) Define pitch adjusting rate (<math>r_{pa}</math>), pitch limits and bandwidth Define harmony memory considering rate (<math>r_{hmc}</math>) while ( <math>t &lt; \text{Max number of iterations}</math> )     Generate new harmonics by accepting best harmonics     Adjust pitch to get new harmonics (solutions)     if (<math>\text{rand} &lt; r_{hmc}</math>), choose an existing harmonic randomly     else if (<math>\text{rand} &lt; r_{pa}</math>), adjust the pitch randomly within limits     else generate new harmonics via randomization     end if     Accept the new harmonics (solutions) if better end while Find the current best solutions End                 </pre>
--

### 3. 제약조건 처리기술

#### 3.1 Penalty Function

벌점함수 (Penalty Function) 기법의 경우 제약조건이 포함된 문제를 제약조건이 없는 문제로 변환하는 것을 기반으로 한다. 즉 이를 위해서 제약조건식을 최적화 문제의 목적함수에 포함하여 고려하게 된다. 이 경우 벌점함수를 적용하기 위하여 일정 수 이상의 매개변수가 필요하다. 이 매개변수의 경우 적절한 값을 사용하였을 경우 상대적으로 우수한 최적해 결과를 얻게 되나, 적절하지 못한 값을 사용할 경우 좋지 못한 해를 얻을 확률이 크다. 따라서 이 제약조건 처리기법의 경우 적절한 매개변수 값의 설정이 매우 중요하다. 이와 같은 한계점에도 불구하고 적용의 간편성에 의해 최적화 기법에서 제약조건을 고려함에 있어 가장 널리 사용되는 방법으로, 제약조건에 위배되는 상황이 발생될 경우 위배되는 정도에 따라 일정 수준의 벌점을 부여해, 최적의 해에서 멀어지

게 하는 방법이다. 이를 수학적으로 표현하면 다음 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$\Phi(\vec{x}) = f(\vec{x}) + p(\vec{x}) \tag{1}$$

여기서,  $\Phi(\vec{x})$ 는 벌칙함수를 고려한 확장된 목적함수를 의미하며,  $p(\vec{x})$ 는 벌칙함수를 나타내며,  $g_i(\vec{x}), i = 1, 2, \dots, m$ 와  $h_j(\vec{x}), j = 1, 2, \dots, p$ 는 각각 부등호 및 등호 벌칙함수를 나타낸다. 벌칙함수  $p(\vec{x})$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m r_i \cdot \max(0, g_i(\vec{x}))^2 + \sum_{j=1}^p c_j \cdot |h_j(\vec{x})| \tag{2}$$

여기서,  $r_i$ 와  $c_j$ 는 벌칙상수를 나타낸다.

#### 3.2 Feasibility Rules

Feasibility Rules는 Deb [17]에 의해 개발된 방법으로, Genetic Algorithm의 효율성을 증대시키기 위해 처음 제안되었다. 따라서 본 방법은 진화 알고리즘의 일종인 Genetic Algorithm과 Differential Evolution에 널리 활용되고 있다. 그러나 이 방법은 두 해를 토너먼트 (tournament) 식으로 비교하는 것으로, 이와 같은 방법은 적합도 (fitness)를 기반으로 하는 다양한 메타휴리스틱 알고리즘에 적용될 수 있다. 이 방법은 벌점함수의 단점을 보완하기 위해 만들어진 것으로, 두 해를 비교할 때 제약조건을 위배여부 판단, 실현 가능해간의 비교, 실현 불가능해간의 비교 기준을 각각 제시하여 제약조건을 처리하는 기술로 제약조건 처리의 세 가지 기준은 다음과 같다.

- 1) 두 실현가능해 간의 비교 시, 목적함수의 값이 우수한 해를 우선 선택한다.
- 2) 하나의 실현가능해와 다른 하나의 실현 불가능해 간의 비교 시, 목적함수의 값과 관계없이 실현 가능해를 우선 선택한다.
- 3) 실현 불가능해 간의 비교 시, 제약조건을 위배하는 정도가 적은 해를 우선적으로 선택한다.

세 번째 기준을 수식으로 표현하면 다음과 식 (3)과 같다.

$$\Phi(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m \max(0, g_i(\vec{x}))^2 + \sum_{j=1}^p |h_j(\vec{x})| \quad (3)$$

여기서,  $\Phi(\vec{x})$ 는 제약조건만을 고려한 벌칙함수를 나타내며,  $g_i(\vec{x}), i = 1, 2, \dots, m$ 와  $h_j(\vec{x}), j = 1, 2, \dots, p$ 는 각각 부등호 및 등호 벌칙함수를 나타낸다.

### 3.3 Stochastic Ranking의 적용

Stochastic Ranking으로 불리는 또 다른 제약조건 처리기법 중의 하나는 Runarsson and Yao [19]에 의해 개발되었다. 본 방법은 벌칙함수의 적용에 있어 과대 또는 과소 부여되는 해로 인한 최적화 효율의 저하를 방지할 수 있다는 장점이 있다. 즉, Stochastic Ranking의 경우 벌칙함수에 사용되는 상수의 불확실성을 개선하기 위해 제안된 방법으로, 제약조건에 위배된 정도와 목적함수 값의 차이에 따른 해간의 순위를 기반으로 제약조건을 처리하는 기술이다. Stochastic Ranking 방법의 의사코드는 다음 Table 2와 같다. 즉, 제약조건이 위배되지 않는 두 해는 목적함수의 값에 의해 우수한 해가 높은 순위를 부여받고, 제약조건이 둘 다 위배되는 해의 경우 그 정도에 따라 해의 순위가 설정된다. 또한 본 방법에서는 Pf라는 일양분포(Uniform distribution)를 따르는 확률상수를 이용하여 제약조건에 위배된 해와 위배되지 않은 해간의 비교를 추가하여 고려한다. 최적화 과정 중 제약조건에 일부 위배되는 해가 있을 경우에도 목적함수의 값이 상대적으로 좋을 경우 높은 순위를 부여함으로써, 최적해 탐색 과정에서 실현가능해와 실현불가능해의 불연속성에 의한 해 탐색 효율의 저하를 방지한다.

Table 2. Pseudo code of Stochastic Ranking

Pseudo Code of Stochastic Ranking
<pre> Begin   For i = 1 to N     For j = 1 to P-1       u=random(0,1)       If (Φ(I<sub>j</sub>)=Φ(I<sub>j+1</sub>)) or (u &lt; P<sub>j</sub>)         If (f(I<sub>j</sub>) &gt; f(I<sub>j+1</sub>))           swap (I<sub>j</sub>, I<sub>j+1</sub>)         else           If (Φ(I<sub>j</sub>) &gt; Φ(I<sub>j+1</sub>))             swap (I<sub>j</sub>, I<sub>j+1</sub>)       End For     End For     If (not swap performed)       break     End For   End           </pre>

여기서,  $I$ 는 각각의 해 집단을 의미하며,  $\Phi(I_j)$ 는 각 대안의 제약조건 위배정도의 합을 나타낸다.  $f(I_j)$ 는 각 대안의 목적함수 값을 의미한다.

### 3.4 ε-Constrained Method

본 방법은 Takahama and Sakai [32]에 의해 제안된 방법으로 두 부분으로 구성된다. 첫 번째는 제약조건을 위배한 범위와 목적함수를 합하여 고려한 비교이며, 두 번째는 제약조건 위배 정도만을 고려한 비교이다. 다시 말해서, ε-Constrained Method는 Feasibility Rules의 적용에 추가적으로 ε이라 하는 상수를 설정하여 실현가능해와 실현불가능해의 불연속성에 의한 최적해 수렴성의 저하를 방지하여 제약조건을 처리하는 기법이다. ε을 고려하여 제약조건을 처리하는 기준은 다음 식(4)와 같다.

$$(f(\vec{x}_1), \Phi(\vec{x}_1)) < \epsilon (f(\vec{x}_2), \Phi(\vec{x}_2)) \Leftrightarrow \begin{cases} f(\vec{x}_1) \leq f(\vec{x}_2), \text{ if } \Phi(\vec{x}_1), \Phi(\vec{x}_2) \leq \epsilon \\ f(\vec{x}_1) \leq f(\vec{x}_2), \text{ if } \Phi(\vec{x}_1) = \Phi(\vec{x}_2) \\ \Phi(\vec{x}_1) < \Phi(\vec{x}_2), \text{ otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

## 4. 적용 및 분석

### 4.1 적용 관망

제안된 네 가지의 제약조건 처리기술을 실제 관수로 관경 최적설계에 적용하여 그 결과를 비교분석하였다. 적용된 문제는 베트남 Hanoi Network와 스페인의 Balerna Network로 공사비용을 최소화하는 관망 설계 최적화의 대표적인 문제이다. 본 최적화 문제의 목적함수는 상수관망을 구성하는 관로의 공사비용의 합을 최소화 하는 것이다. 제약조건으로는 상수관망 네트워크에서 각 절점의 유량은 항상 보존된다는 질량보존 방정식, 모든 경로에서의 에너지는 보존된다는 에너지 방정식, 그리고 각 절점에서의 압력은 지정된 최소압력 이상의 값을 만족해야 한다. 본 적용에서는 최적화 단계에서 상수관망 수리해석 프로그램인 EPAnet [33]을 수행하여 질량보존 법칙과 에너지방정식의 경우 항상 만족되는 결과를 도출할 수 있고, 실제 제약조건 처리에서 사용되는 제약조건은 각 절점에서의 최소압력 기준으로 한정된다.

#### 4.1.1 Hanoi 상수관망

Hanoi Network는 Fig. 1과 같이 베트남의 Hanoi시의 상수관망으로 Fujiwara and Khang [34]이 최초로 제안

하였다. 관망은 34개의 관과 31개의 수요절점으로 구성되어 있으며, 크게 3개의 폐합회로로 이루어져 있다. 수두가 100m인 배수지가 연결되어 있다. 제약조건으로 사용되는 최소 요구수압은 30m이며, Hanoi 관망에서 사용될 수 있는 상업용 단위길이 공사비용은 Table 3과 같다. 본 네트워크의 최적값 (Global Optimum)은 \$ 6.081M으로 알려져 있다.

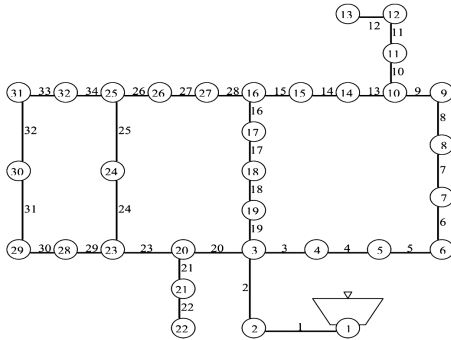


Fig. 1. Schematic layout of the Hanoi Network

Table 3. Commercial pipe diameters and their costs for the Hanoi network

No.	Pipe Diameter (mm)	Cost (\$/m)
1	304.8	45.726
2	406.4	70.4
3	508.0	98.378
4	609.6	129.333
5	762.0	180.748
6	1016.0	278.28

#### 4.1.2 Balerma 농업용 관수로

Balerma Network는 Fig. 2와 같이 스페인에 위치한 농업용 관수로 시스템으로 Reca et al. [35]이 최초로 제시한바 있다. 관망은 4개의 배수지로 전체시스템의 물이 공급되며, 8개의 폐합회로로 구성되어 있다. 본 최적화 모형에서 결정변수의 개수로 활용되는 총 관로의 개수는 454개이며, 443개의 수요절점으로 구성되어 있다. 제약조건으로 사용되는 각 절점의 최소 요구수압은 20m이며, Balerma 관망에서 사용될 수 있는 상업용 단위길이 공사비용은 Table 4와 같다. 본 네트워크의 정확한 전역해 값은 문제의 크기가 커 현재까지 제시되어 있지 않다.



Fig. 2. Schematic layout of the Balerma Network

Table 4. Commercial pipe diameters and their costs for the Balerma Network

No.	Pipe Diameter (mm)	Cost (€/m)
1	113	7.22
2	126.6	9.1
3	144.6	11.92
4	162.8	14.84
5	180.8	18.38
6	226.2	28.6
7	285	45.39
8	361.8	76.32
9	452.2	124.64
10	581.8	215.85

#### 4.2 분석결과 - Hanoi 상수관망

적용된 각 제약조건 처리기법을 Table 5와 같이 Case 1부터 Case 4까지로 명기하였다. 각 방법에 사용되는 매개변수의 경우 Case 2를 제외한 Case 1, Case 3, 그리고 Case 4의 경우  $C_j$ ,  $P_f$ , 그리고  $\epsilon$ 과 같은 상수를 사용하게 되어 결과에 영향을 미칠 수 있지만, 본 연구에서는 사전에 다양한 Case의 상수를 적용하여 문제 적합한 매개변수를 설정한 후 결과를 도출하였다. 각 Case 별 HS의 매개변수 값은 제약조건 처리기법 별 최적화 효율을 비교 분석하기 위하여 HMS는 30개, HMCR의 값은 0.95, PAR의 값은 0.10, 그리고 최적화 종결조건으로 최대 반복계산횟수 (Number of Function Evaluations, NFEs)를 30,000번으로 모두 동일하게 설정하였다. 최대 반복계산 횟수는 최적화 과정에서 목적함수를 계산한 횟수를 의미한다. 이와 같이 각 방법별 최대 반복 계산 횟수를 동일하게 하는 이유는 상수관망 최적 설계 시 최적화 프로그램의 수행시간에 가장 영향을 많이 미치는 부분이

EAPnet 수리해석의 호출을 통한 목적함수 (비용)와 제약조건을 계산하는 과정이기 때문이다. 즉, 30,000번의 최대 반복 계산 횟수를 동일하게 하는 것을 통해 각 방법별 최적과 소요시간을 거의 같게 만들어 결과 값의 공정한 비교를 가능하게 하였다.

Table 5. Parameters of application methods

Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Penalty Function (Cj = 100,000)	Feasibility Rules	Stochastic Ranking (PF=0.1)	$\epsilon$ -Constrained Method ( $\epsilon = 10,000$ )

각 제약조건 처리기법 별로 100번의 최적화를 수행하였으며, 그 결과를 정리한 표와 그림은 다음 Table 6 및 Fig. 3과 같다. 네 가지 방법 중 최적의 값을 도출한 방법은 Case 3 (Stochastic Ranking)과 Case 4 ( $\epsilon$ -Constrained Method)로 나타났으며, 이 두 가지 방법 중 최적해의 평균과 편차가 적게 나타난 기법은 Case 4 ( $\epsilon$ -Constrained Method)로 나타났다. 기법 별로 문제의 성격과 매개변수의 설정 등에 의해 결과가 다소 달라질 수 있겠지만, Case 4 ( $\epsilon$ -Constrained Method)의 경우 실현가능해와 실현불가능해 사이의 불연속성 문제를  $\epsilon$ 이라는 상수를 통해 어느 정도 보완함에 따라 다른 방법에 비해 좋은 결과를 도출한 것으로 판단된다. 적용의 용이성으로 인해 제약조건처리 방법으로 가장 많이 활용되는

Case 1 (Penalty Function)의 경우 최적해의 평균적인 값이 다른 방법에 비해 큰 차이 없이 나타나 적용성에는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 하지만 최적해의 최소값과 최대값의 차이가 크게 나타나, 경우에 따라서는 좋지 않은 결과가 나타날 수 있다는 문제를 지니는 것으로 파악된다. Case 2 (Feasibility Rules) 방법의 경우 다른 방법과 비교해 매개변수를 사용하지 않는다는 큰 장점을 지닌다.

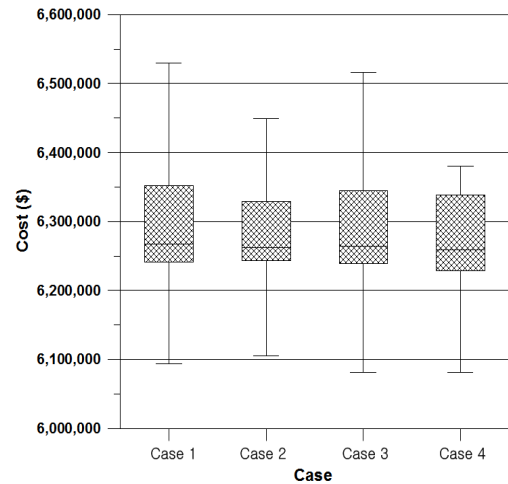


Fig. 3. Box-Whisker plot of cost optimization in Hanoi Network

Table 6. Application Results of Hanoi Network

Case	Cost Function Values (\$, 100 runs)		
	Average	Max.	Min.
Case 1 (Penalty Function; Cj = 100,000)	6,284,774	6,529,598	6,093,506
Case 2 (Feasibility Rules)	6,272,608	6,448,986	6,105,639
Case 3 (Stochastic Ranking; Pf = 0.1)	6,280,617	6,516,645	6,081,128
Case 4 ( $\epsilon$ -Constrained Method ; $\epsilon = 10,000$ )	6,270,329	6,380,707	6,081,128

Table 7. Comparison Results among Other Previous Studies of Hanoi Network

Algorithm	Cost Function Values (\$)			NFEs
	Average	Max.	Min.	
Genetic Algorithm (GA) (Reca et al. [35], 10 runs)	6,575,682	N/A	6,173,421	26,457
Simulated Annealing (SA) (Reca et al. [35], 10 runs)	6,483,950	N/A	6,333,207	26,457
Mixed Simulated Annealing and Tabu Search (MSATS) (Reca et al. [35], 10 runs)	6,538,453	N/A	6,352,526	26,457
Ant Colony Optimization (ACO) (Zecchin et al. [36], 20 runs)	6,394,000	6,635,000	6,134,000	85,571

최종적으로 네 가지 제약조건 처리기법을 적용한 결과, 다양한 최적화 문제에 추가적인 적용이 필요할 것으로 판단되지만 Case 1 (Penalty Function)과 Case 2 (Feasibility Rules) 기법의 특성을 모두 가지고 있는 Case 4 ( $\epsilon$ -Constrained Method)가 새로운 제약조건 처리기법으로 활용될 경우 보다 효율적인 최적해를 얻을 확률이 높음을 확인하였다.

Table 7에는 지금까지 연구된 Hanoi Network에 대한 관로 최소비용설계 연구결과들이 제시되어 있다. 이 결과를 Table 6와 비교하여 살펴보면, 대표적인 메타휴리스틱 기법인 GA, SA, 그리고 Ant Colony Optimization (ACO) 등의 결과 뿐 만 아니라 SA의 개량된 형태인 Mixed Simulated Annealing and Tabu Search (MSATS)의 결과 보다 제안된 제약조건 처리기법을 활용한 HS가 더 좋은 결과를 나타낸 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 HS 자체가 다른 메타휴리스틱 알고리즘과 비교하였을 경우에도 효율적인 결과를 얻었을 뿐 만 아니라, 추가적인 제약조건 처리방안을 고려할 경우 더 좋은 최적해를 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

### 4.3 분석결과 - Balerma 농업용 관수로

각 Case 별 HS의 매개변수 값은 제약조건 처리기법 별 최적화 효율을 비교 분석하기 위하여 HMS는 30개, HMCR의 값은 0.98, PAR의 값은 0.01, 그리고 최적화 종결조건으로 최대 반복계산횟수를 45,400번으로 모두 동일하게 설정하였다.

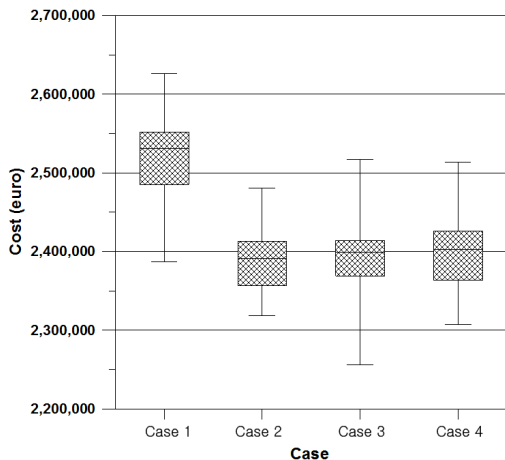


Fig. 4. Box-Whisker plot of cost optimization in Balerma Network

각 제약조건 처리기법 별로 30번의 최적화를 수행하였으며, 그 결과를 정리한 표와 그림은 다음 Table 8 및 Fig. 4와 같다. 네 가지 방법 중 가장 최소의 값을 도출한 방법은 Case 3 (Stochastic Ranking)로 나타났다. Case 3 (Stochastic Ranking) 다음으로 좋은 최소비용이 나타난 방법은 Case 4 ( $\epsilon$ -Constrained Method)이다.

두 가지 방법 중 최적해의 평균과 편차가 적게 나타난 기법은 Case 4 ( $\epsilon$ -Constrained Method)로 나타났다. 이 결과는 Hanoi Network와 비슷한 경향으로, 비록 Case 3 (Stochastic Ranking) 방법의 결과가 Case 4 ( $\epsilon$ -Constrained Method)에 비해 최소비용 측면에서 좋게 나타났지만, 안정적인 해의 탐색에 있어서는 Case 4 ( $\epsilon$ -Constrained Method)가 보다 나은 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 적용의 용이성으로 인해 제약조건처리 방법으로 가장 많이 활용되는 Case 1 (Penalty Function)의 경우 최적해의 평균적인 값이 Hanoi Network의 결과와는 달리 다른 방법에 비해 큰 차이가 나타나 적용성에 문제가 있는 것으로 나타났다. 이것은 결정변수의 개수가 Hanoi Network와 (34개)는 달리 Balerma Network (454개)가 10배 이상임을 고려하였을 때, 결정변수의 크기가 커질수록 벌칙함수의 경우 실현 가능해와 실현불가능해 사이의 불연속성 문제를 해결하기 어려운 것을 확인할 수 있다.

Case 2 (Feasibility Rules) 방법의 경우 Hanoi Network의 결과와 유사하게 다른 제안된 방법에 비하여 최소비용의 경우 좋지 않은 결과를 나타내었지만, 사용성 측면을 고려하였을 경우, 매개변수를 사용하지 않는다는 큰 장점이 있으므로 그 활용가치가 높은 것으로 판단할 수 있다. 네 가지 제약조건 처리기법을 적용한 결과, 전통적인 제약조건 처리방법으로 사용되던 벌칙함수에 비해 제안된 제약조건 처리기법을 HS에 접목하여 적용하였을 경우 그 결과가 효율적임을 확인하였다.

Table 9에는 지금까지 연구된 Balerma Network에 대한 관로 최소비용설계 연구결과들이 제시되어 있다. 이 결과를 Table 8와 비교하여 살펴보면, Hanoi Network의 결과와 마찬가지로 대표적인 메타휴리스틱 기법인 GA, SA의 결과 뿐 만 아니라 MSATS와 HS의 개량된 형태인 Particle Swarm Harmony Search (PSHS)의 결과보다도 제안된 제약조건 처리기법을 활용한 HS가 더 좋은 결과를 나타낸 것을 확인할 수 있다.

**Table 8.** Application results of Balerma Network

Case	Cost Function Values (€, 30 trials)		
	Average	Max.	Min.
Case 1 (Penalty Function; $C_j = 100,000$ )	2,518,255	2,626,390	2,386,613
Case 2 (Feasibility Rules)	2,388,486	2,480,497	2,318,345
Case 3 (Stochastic Ranking; $Pf=0.1$ )	2,389,946	2,516,713	2,255,892
Case 4 ( $\epsilon$ -Constrained Method ; $\epsilon =10,000$ )	2,400,179	2,513,392	2,307,304

**Table 9.** Comparison Results among other Previous Studies of Balerma Network

Algorithm	Cost Function Values (Best Values)
Genetic Algorithm (GA) (Reca et al. [35])	3,737,600
Simulated Annealing (SA) (Reca et al. [35])	3,475,740
Mixed Simulated Annealing and Tabu Search (MSATS) (Reca et al. [35])	3,298,268
Particle Swarm Harmony Search (Geem [37])	2,601,000

## 5. 결론

본 연구에서는 Harmony Search (HS) 최적화 기법의 효율성 증대를 위하여 세 가지의 제약조건 처리 기법을 제안하고 그 결과를 기존의 방법과 비교 분석하였다. 제안된 방법을 결정변수의 개수가 상이한 두 상수관망 최적설계 문제에 적용하였다. 그 결과 전통적인 제약조건 처리방법으로 사용되는 벌칙함수 방법에 비해 제안된 제약조건 처리기법을 HS에 적용하였을 경우 그 결과가 효율적인 것으로 나타났다. 특히 결정변수의 개수가 큰 경우 기존 방법 대비 효율성이 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 제안된 방법들 중 특히,  $\epsilon$ -Constrained Method의 경우 기존방법에 비하여 평균적으로 안정적인 결과를 도출하였다. 제안된 방법은 많은 노력과 시간이 투자되는 새로운 최적화 알고리즘을 개발하는 대신 제약조건 처리 기술의 접목을 통해 상당히 효율적인 HS의 최적화 결과를 얻을 수 있다는 데 장점이 있다.

향후 본 연구에서 적용된 이산형 공학 최적화 문제 뿐만 아니라 제약조건이 있는 연속형 공학 최적화 문제에도 제안된 방법을 적용하여 효율성을 검증할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] Holland J. H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press, 1975.
- [2] Glover F. "Heuristics for integer programming using surrogate constraints." *Decision Sciences* 8.1 (1977): 156-166. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1540-5915.1977.tb01074.x>
- [3] Kirkpatrick S. and Vecchi M. P. "Optimization by simulated annealing." *science* 220.4598 (1983): 671-680.
- [4] Dorigo M. "Optimization, learning and natural algorithms." *Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy* 1992.
- [5] Eberhart R. C. and Kennedy J. "A new optimizer using particle swarm theory." *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*. Vol. 1. 1995. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MHS.1995.494215>
- [6] Storn R. and Kenneth V. "Minimizing the Real Functions of the ICEC'96 Contest by Differential Evolution." *International Conference on Evolutionary Computation*. 1996. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/iccc.1996.542711>
- [7] Geem Z. W., Kim J. H. and Loganathan G. V. "A new heuristic optimization algorithm: harmony search." *Simulation* 76.2 (2001): 60-68. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/003754970107600201>
- [8] Kim J. H., Geem Z. W. and Kim E. S. "Parameter



- Estimation Of The Nonlinear Muskingum Model Using Harmony Search." (2001): 1131-1138.
- [9] Nakrani S. and Tovey C. "On honey bees and dynamic server allocation in internet hosting centers." *Adaptive Behavior* 12.3-4 (2004): 223-240.
- [10] Yang X. S. "Firefly algorithm, Levy flights and global optimization." *Research and Development in Intelligent Systems XXVI*. Springer London, 2010a. 209-218.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84882-983-1\\_15](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84882-983-1_15)
- [11] Yang X. S. "A new metaheuristic bat-inspired algorithm." *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010b)*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 65-74.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6\\_6](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6)
- [12] Yang X. S. and Deb S. "Engineering optimisation by cuckoo search." *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation* 1.4 (2010): 330-343.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJMMNO.2010.035430>
- [13] Eskandar H., Sadollah A., Bahreininejad A. and Hamdi M. "Water cycle algorithm - A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems." *Computers & Structures* 110 (2012): 151-166.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.07.010>
- [14] Sadollah A., Bahreininejad A., Eskandar H. and Hamdi M. "Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables." *Computers & Structures* 102 (2012): 49-63.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.03.013>
- [15] Michalewicz Z. "A Survey of Constraint Handling Techniques in Evolutionary Computation Methods." *Evolutionary Programming* 4 (1995): 135-155.
- [16] Deb K. and Agrawal S. "A niched-penalty approach for constraint handling in genetic algorithms." *Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms*. Springer Vienna, 1999.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-6384-9\\_40](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-6384-9_40)
- [17] Deb K. "An efficient constraint handling method for genetic algorithms." *Computer methods in applied mechanics and engineering* 186.2 (2000): 311-338.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00389-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00389-8)
- [18] Hilton A. B. C. and Culver T. B. "Constraint handling for genetic algorithms in optimal remediation design." *Journal of Water Resources Planning and Management* 126.3 (2000): 128-137.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2000\)126:3\(128\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:3(128))
- [19] Runarsson T. P. and Yao X. "Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization." *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 4.3 (2000): 284-294.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/4235.873238>
- [20] Coello C. A. C. "Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art." *Computer methods in applied mechanics and engineering* 191.11 (2002): 1245-1287.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00323-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00323-1)
- [21] Coello C. A. C. and Montes E. M. "Constraint-handling in genetic algorithms through the use of dominance-based tournament selection." *Advanced Engineering Informatics* 16.3 (2002): 193-203.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1474-0346\(02\)00011-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1474-0346(02)00011-3)
- [22] Lampinen J. "A constraint handling approach for the differential evolution algorithm." *Computational Intelligence, Proceedings of the World on Congress on*. Vol. 2. IEEE, 2002.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/cec.2002.1004459>
- [23] Miettinen K., Mäkelä M. M. and Toivanen J. "Numerical comparison of some penalty-based constraint handling techniques in genetic algorithms." *Journal of Global Optimization* 27.4 (2003): 427-446.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1026065325419>
- [24] Pulido G. T. and Coello C. A. C. "A constraint-handling mechanism for particle swarm optimization." *Evolutionary Computation, 2004. CEC2004. Congress on*. Vol. 2. Ieee, 2004.
- [25] Chootinan P. and Chen A. "Constraint handling in genetic algorithms using a gradient-based repair method." *Computers & operations research* 33.8 (2006): 2263-2281.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2005.02.002>
- [26] Oyama A., Shimoyama K. and Fujii K. "New constraint-handling method for multi-objective and multi-constraint evolutionary optimization." *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences* 50.167 (2007): 56-62.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.2322/tjsass.50.56>
- [27] Mallipeddi M. and Suganthan P. N. "Ensemble of constraint handling techniques." *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 14.4 (2010): 561-579.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEVC.2009.2033582>
- [28] Zhang H. and Rangaiah G. P. "An efficient constraint handling method with integrated differential evolution for numerical and engineering optimization." *Computers & Chemical Engineering* 37 (2012): 74-88.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.09.018>
- [29] Yun J. J. and Lee H. K. "Job Shop Scheduling by Tabu Search Combined with Constraint Satisfaction Technique." *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering* 25.71 (2002): 92-101.
- [30] Jung H. E., Jeon S. B. and Jo G. S. "A Web-based Spatial Layout Planning System with Constraint

Satisfaction Problems." *Journal of Korea Institute of Information Scientists and Engineering: Computing Practices and Letters* 6.2 (2000): 216-224.

- [31] Baek C. W., Kim E. S., Park M. J. and Kim J. H. "Development of Optimal Decision-Making System for Rehabilitation of Water Distribution Systems Using ReHS." *Journal of Korea Water Resources Association* 38.3 (2005): 199-212.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2005.38.3.199>
- [32] Takahama T. and Sakai S. "Constrained optimization by  $\epsilon$  constrained differential evolution with dynamic  $\epsilon$ -level control." *Advances in Differential Evolution*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. 139-154.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68830-3\\_5](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68830-3_5)
- [33] Rossman L. A. "EPANET 2: users manual." (2000).
- [34] Fujiwara O. and Khang D. B. "A two phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks." *Water resources research* 26.4 (1990): 539-549.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/WR026i004p00539>
- [35] Reca J., Martínez J., Gil C. and Baños R. "Application of several meta-heuristic techniques to the optimization of real looped water distribution networks." *Water Resources Management* 22.10 (2008): 1367-1379.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-007-9230-8>
- [36] Zecchin, A. C., Simpson, A. R., Maier, H. R., Leonard, M., Roberts, A. J. and Berrisford, M. J. "Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation." *Mathematical and computer modelling* 44.5 (2006): 451-468.
- [37] Geem, Z. W. "Particle-swarm harmony search for water network design." *Engineering Optimization* 41.4 (2009): 297-311.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/03052150802449227>

### 유 도 근(Yoo Do Guen)

[정회원]



- 2007년 2월 : 고려대학교 사회환경 시스템공학과 (공학사)
- 2009년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2013년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 수자원공학 (공학박사)

<관심분야>

수자원공학, 수자원시스템공학, 최적화 알고리즘

### 이 호 민(Lee Ho Min)

[정회원]



- 2012년 2월 : 고려대학교 사회환경 시스템공학과 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 수자원공학전 공 석박사통합과정

<관심분야>

수자원공학, 수자원시스템공학, 최적화 알고리즘

### 이 의 훈(Lee Eui Hoon)

[정회원]



- 2003년 2월 : 고려대학교 토목환경 공학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 고려대학교 사회환경 시스템공학과 수자원공학 (공학석사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 수자원공학전 공 박사과정

<관심분야>

수문학, 수리학, 수자원공학

### 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, 최적화 알고리즘