ISSN(Print): 1225-7672 / ISSN(Online): 2287-822X
DOI http://dx.doi.org/10.11001/jksww.2015.29.3.293

Multi-objective Harmony Search 알고리즘을 이용한 상수도 관망 다목적 최적설계

Optimal Design of Water Supply System using Multi-objective Harmony Search Algorithm

최영환[1]·이호민[1]·유도근[2]·김중훈[3*]
Choi, Young-Hwan[1]·Lee, Ho-Min[1]·Yoo, Do-Guen[2]·Kim, Joong-Hoon[3*]

[1]고려대학교 건축사회환경공학과, [2]고려대학교 방재과학기술연구소, [3]고려대학교 건축사회환경공학부
[1]*Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University*
[2]*Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University*
[3]*School of Civil Environmental and Architectural Engineering, Korea University*

ABSTRACT

Optimal design of the water supply pipe network aims to minimize construction cost while satisfying the required hydraulic constraints such as the minimum and maximum pressures, and velocity. Since considering one single design factor (i.e., cost) is very vulnerable for including future conditions and cannot satisfy operator's needs, various design factors should be considered. Hence, this study presents three kinds of design factors (i.e., minimizing construction cost, maximizing reliability, and surplus head) to perform multi-objective optimization design. Harmony Search (HS) Algorithm is used as an optimization technique. As well-known benchmark networks, Hanoi network and Gyeonggi-do P city real world network are used to verify the applicability of the proposed model. In addition, the proposed multi-objective model is also applied to a real water distribution networks and the optimization results were statistically analyzed. The results of the optimal design for the benchmark and real networks indicated much better performance compared to those of existing designs and the other approach (i.e., Genetic Algorithm) in terms of cost and reliability, cost, and surplus head. As a result, this study is expected to contribute for the efficient design of water distribution networks.

Key words: Multi-objective Harmony Search Algorithm, Multi-objective optimal design, Minimum cost, Maximum reliability, Maximum surplus head

주제어: 다목적 하모니 서치 알고니즘, 다목적 최적설계, 설계비용 최소화, 신뢰도 최대화, 여유수두 최대화

1. 서 론

상수도 관망은 대표적인 사회기반시설로 수원으로부터 수용가에 이르기까지 효율적으로 유량을 공급하는 것을 그 목표로 한다. 초기의 상수도 관망 설계에서는 엔지니어의 경험을 바탕으로 한 시행착오적 설계 기법이나, 수학적 해 탐색 기법이 사용되었다. 대표적으로 Mandl (1981)은 분기형 관망에 대해 수학적인 함수를 기반으로 한 비용 최소화 기법을 적용하였으며, Monbaliu et al. (1990)은 Gradient search technique을 통해 반복적인 연산과정으로 수리학적 조건을 만족시키는 설계안을 도출한바 있다. 이후 연구자들은 분기형과 폐합형 관망이 통합되어있는 실제 규모 복잡한 상수도 관망설계를 위해 선형함수를 기

Received 10 February 2015; Revised 30 April 2015; Accepted 4 May 2015
*Corresponding author: Kim, Joong Hoon (E-mail: jaykim@korea.ac.kr)

초로 상수도 관망 최적설계프로그램이 개발하였다. 그러나 Gessler and Walski (1985)는 실제 상수도 관망의 경우, 많은 비선형적인 요소들을 포함하고 있어, 선형 함수를 기반으로 한 기법에는 한계점이 있다고 지적하였다. 이를 극복하기 위해 일부 연구자들 (Shamir 1974, El-Bahrawy and Smith 1985, Chiplunkar et al. 1986, El-Bahrawy and Smith 1987, Su et al. 1987, Lansey and Mays 1989)은 비선형함수를 이용한 관망 최적설계 기법들을 제안하였다. 하지만, 이러한 비선형적인 기법 또한 최적의 솔루션을 보장할 수 없으며, 비연속적인 문제에서 효율이 떨어지는 문제가 제기되어 시뮬레이션을 기반으로 한 메타 휴리스틱 기법이 제안, 적용되고 있다.

초기 메타 휴리스틱 기법을 적용한 상수도 관망 설계는 관망시스템의 운영비용 (유지비, 수리비 등)과 관망 시공비용 중에 관의 재료비 즉, 관경에 따른 비용이 상수도 관망의 최종적인 비용을 결정한다는 가정하에 시공비용의 최소화만을 고려한 설계가 진행되어 왔다 (Alperovits and Shamir, 1977, Quindry et al., 1981, Ormsbee and Contractor, 1981, Fujiwara and Khang, 1990, Simpson et al., 1994). 그러나 현대사회에서는 관망의 시공비용 최소화만을 고려한 관망 최적설계는 실용적 측면에서 제한적인 면을 보이고 있기 때문에 최적화를 이용한 관망의 설계가 실무에서 적용이 가능하도록 시공비용의 최소화 뿐만 아니라 관망의 급수의 안정성, 비정상상태를 고려한 설계 등을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 최근 국내에서는 일부 연구자들 (Jung et al., 2010, Kim, 2013)에 의해서 Multi-objective Genetic Algorithm (MOGA)을 사용하여 상수관망 다목적 최적설계에 관한 연구가 진행되었지만, Genetic Algorithm에 한정된 연구만 진행되어왔다.

따라서 본 연구에서는 앞서 설명한 상수도 관망의 이상적인 설계를 위해 Harmony Search(HS) 알고리즘을 이용하여 관로비용 최소화, 신뢰도 최대화, 절점의 여유 수두 합 최대화의 설계인자들을 적용한 상수도 관망 다목적 최적설계를 수행하였다.

2. Multi-objective Harmony Search (MOHS)

Multi-objective Harmony Search (MOHS) 알고리즘은 Geem et al. (2001)에 의해 제안된 HS 알고리즘을 기반으로 한 다목적 최적화 기법으로 본 연구에서는, HS 알고리즘에 Fonseca and Fleming (1993)에 의해 제안된 비지배해 분류 (Non-dominated sorting)와 Deb et al. (2000)에 의해 제안된 밀집거리 개념 (Crowding- distance)을 접목한 MOHS를 제안, 적용하였으며 알고리즘을 통한 최적해의 탐색 과정은 다음과 같다.

- 단계 1: (초기 메모리 설정) 초기 하모니 메모리 (HM)를 구성 한다.
- 단계 2: (적합도 평가) 목적함수의 함수값을 계산한다.
- 단계 3: (새로운 메모리 생성) HMCR, PAR 과정을 통해 새로운 HM을 구성한다.
- 단계 4: (적합도 평가) 새롭게 생성된 메모리의 목적함수를 계산한다.
- 단계 5: (비지배해 분류절차) 계산된 목적함수를 통해 비지배 순위를 결정한다.
- 단계 6: (메모리 갱신) 비지배 순위가 낮은 개체는 보존하며, 만약 순위가 동일한 경우에는 밀집거리를 계산하여 이 거리가 큰 개체를 보존한다.

2.1 Harmony Search (HS)

HS는 Genetic Algorithm (GA), Ant Colony Optimization (ACO), Particle Swarm Optimization (PSO)과 같은 메타 휴리스틱 기법으로, 화음이라는 인공적인 현상에서 착안하여 만들어진 알고리즘이다. 여러 가지 악기의 소리가 화음을 이루는 과정에서, 만들어지는 화음 중에 잘 어울리는 화음이 있고, 불협화음을 내는 경우도 존재하지만, 훈련의 과정 (반복계산)을 통해 불협화음은 점차 사라지게 되고, 적합한 화음 (Local optimum) 중에서도 미적으로 가장 아름다운 화음 (Global optimum)을 이룰 수 있을 것이다. HS에서 탐색하고자 하는 각 결정변수는 악기에 대비되고, 각 악기의 소리의 조합인 화음은 하나의 해를 의미한다. HS에서는 최적해 탐색을 위해 몇 가지 매개변수들이 사용되며, HM (Harmony memory), HMCR (Harmony memory considering rate), PAR (Pitch adjusting rate)등이 있고, HM의 크기는 HMS (Harmony memory size)라고 한다.

2.2 다목적 최적화 기법

다목적 최적화 기법은 상충관계 (Trade off)가 존재

하는 2가지 이상의 목적함수를 고려하여 최적해를 탐색하는 기법이다. 다목적 최적해를 탐색하는 방법으로는 각각의 목적함수에 따른 우선순위를 결정하여 높은 우선순위를 가지고 있는 메모리를 보존하는 방법이 있다. 이 방법이 비지배해 정렬 방법 (Fonseca and Fleming 1993)이다. 이 방법은 비지배해 정렬을 통해 높은 우선순위를 갖는 해를 보존하게 되는데 만약 동일한 우선순위를 갖는 해 중에서 보존할 해를 선택해야 하는 경우 밀집거리 개념을 도입하여 각각의 밀집거리가 큰 해를 보존한다.

우선, 비지배해 정렬 방법은 Fonseca and Fleming (1993)에 의해 제안된 방법으로 다목적 최적화 문제를 해결하기 위해 적용된 기법이다. 이 방법은 개체의 비지배정도에 따라 순위를 부여하여 그 순위에 의해 적응도를 구하는 방법이다.

- 단계 1: 먼저 모집단 내의 모든 개체에 대하여 지배여부를 조사하여 비지배되는 개체에 순위 1을 부여하고 이들을 모집단에서 제거한다.
- 단계 2: 다시 새로운 모집단 내 개체들에 대하여 지배 여부를 조사하여 비지배개체에 순위 2를 부여하고 이들을 모집단에서 제거한다.
- 단계 3: 모든 개체에 순위가 부여될 때까지 이와 같은 과정을 반복한다.

Fig. 1은 솔루션 8개의 순위를 나타내고 있다. 먼저 개체 A, B, C, D, E는 비지배개체이기 때문에 순위 1을 부여한다. 개체 G는 하나의 개체 C에 의해 지배되므로 순위 2를 부여하고 개체 F는 두 개의 개체 B와 C에 의해 지배되므로 순위 3을 부여한다. 이와 같은 방법으로 모든 개체에 순위를 부여하면 H는 순위 6을 나타낸다.

한편, 다목적 최적화는 다수의 목적함수를 최적화한다. 이때 다목적 최적화의 우수한 해를 결정하기 위해 결과로 도출된 해에 대해 우선순위를 결정하게 된다. 또한 새로운 해를 발생시킨 후 높은 우선순위를 갖는 해부터 보존하게 한다. 만약 동일한 우선순위의 해 중 보존할 해를 선택해야 하는 경우 보존되는 해의 다양성을 향상시키기 위해 적용하는 방법이 Deb et al. (2000)에 의해 제안된 밀집거리 (Crowding distance) 개념이다. Fig. 2는 밀집거리 개념의 모식도이며, 목적함수 f_1 과 f_2 의 비지배해가 위치되어 있다. 여기서 이웃하는 동일순위 의 비지배해 i를 기준으로 j 와 k 의 밀집거리를 측정하여 밀집거리가 가장 작은 k 부터 제거하여 모집단의 크기로 조정한다. 이러한 밀집거리 개념을 사용하면서 제한된 모집단의 크기에서 넓은 범위의 해집합을 얻을 수 있다.

$$d(i) = \left|f_1(i) - f_1(k)\right| + \left|f_2(i) - f_2(k)\right| \quad (1)$$

여기서, $d(i)$: i 의 밀집거리 (mm)
f_1, f_2 : 목적함수

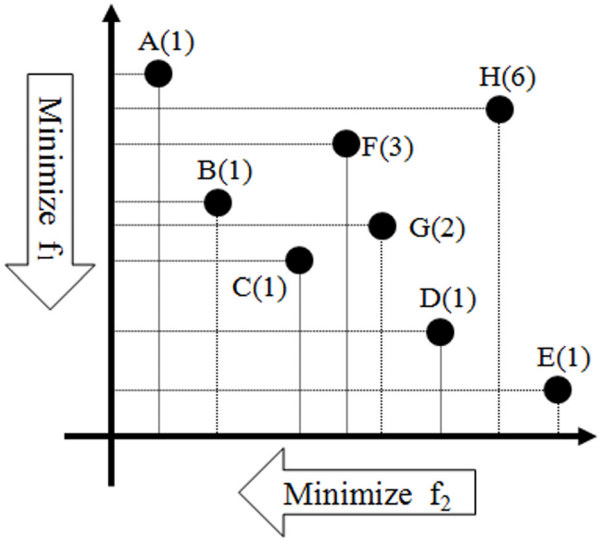

Fig. 1. The concept of non-dominated sorting (Fonseca and Fleming, 1993).

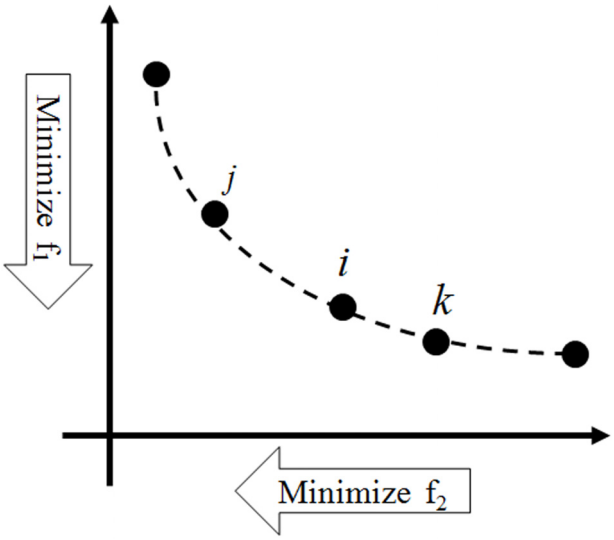

Fig. 2. The concept of crowding distance (Deb et al., 2000).

3. 모형 개발

본 연구에서는 상수도 관망 시스템의 설계비용과 시설의 노후화, 구조적인 취약성의 지표인 신뢰도, 비정상 상태의 유량공급의 가능성을 나타내는 절점의 여유수두 합 등 3가지의 설계인자를 고려한 다목적 최적설계 모형을 개발하였다. 3개의 목적함수 중 서로 분명한 상충관계를 나타내는 설계비용 최소화와 신뢰도 최대화, 설계비용 최소화와 여유수두 합 최대화를 각각 시나리오의 목적함수로 적용하였다.

3.1 목적함수

3.1.1 설계비용 최소화

상수도 관망 시스템을 설계함에 있어서 가장 기초적인 목적함수는 설계비용을 최소화하는데 있다. 상수도 관망의 설계비용은 상업용 관경별 비용과 각 관로의 길이의 곱으로 나타내며, 네트워크의 모든 관의 비용을 합한 것으로 나타낸다. 이에 본 연구에서는 Shamir and Howard (1968)에 제시된 관망 설계비용 함수식을 사용하였다.

$$\text{cost} = \sum_{i=1}^{N} C(D_i)L_i \tag{2}$$

여기서, $C(D_i)$=관로 i 의 단위길이 (m)당 비용함수
L_i= 관로 i 의 길이 (m)
D_i= 관로 i 의 관경 (mm)
N= 관로의 총 개수

3.1.2 신뢰도 최대화

상수도 관망의 신뢰도 (Reliability)는 상수도 관망의 상태를 표현하는 중요한 지표로서, 설계뿐만 아니라 적절한 유지관리에 있어서 중요한 역할을 한다. 이러한 신뢰도는 크게 기계적인 신뢰도와 수리학적인 신뢰도로 구분 할 수 있다. 기계적인 신뢰도는 상수도 관망 시스템의 관, 펌프, 밸브 등 시스템 구성요소의 수리나 교체 없이 지속적으로 용수공급 할 수 있는 시스템의 능력이며, 수리학적인 신뢰도는 소비자들에게 적절한 수압으로 충분한 물을 공급할 수 있는 시스템의 능력을 의미한다. 이러한 이유로 상수도 관망의 신뢰도는 시스템이 파괴를 유발하지 않는 확률 또는 정상상태를 유지할 확률로 정의할 수 있다.

이에 본 연구에서는 Su et al. (1987)에 의해 제안된 St. Louis 시에서 장기간의 상수도 관망의 파괴기록으로부터 추정된 회귀식을 사용하여 신뢰도를 추정하였다.

$$\begin{aligned}
\alpha_i &= \frac{0.6858}{D_i^{3.28}} + \frac{2.7158}{D_i^{1.3131}} + \frac{2.7685}{D_i^{3.5792}} + 0.042 \\
\beta_i &= \alpha_i \times L_i \\
f_i &= 1 - e^{-\beta_i} \\
\gamma &= 1 - f_i
\end{aligned} \tag{3}$$

여기서,
α_i= 관로 i 의 단위 길이 당 연간 관 파괴횟수 (Breaks/mile/year)
β_i= 관로 i 의 연간 관 파괴횟수 (Breaks/year)
f_i= 파괴율
γ= 신뢰도

추정식을 통해 얻은 신뢰도 (γ)는 0~1의 범위를 가지며, 신뢰도의 값은 클수록 좋은 신뢰도를 나타낸다. 만약, 신뢰도가 1에 가까울수록 관의 연간 파괴횟수가 적다는 것을 나타내며, 관망의 상태가 양호하다는 것을 의미한다.

3.1.3 절점의 여유수두 합 최대화

일반적으로, 관로의 최소비용만 고려한 상수도 관망 최적설계를 수행하면, 수리학적인 제약조건에 부합하는 최적설계 결과가 도출된다. 이것은, 수리학적 제약조건으로 일반적으로 사용되는 절점의 압력 범위 내에서 설계된다는 것이다. 즉, 정상상태 (수리학적 제약조건이 만족한 상태)의 사용성을 만족하는 설계안이 될 수 있지만, 만약 관로의 파괴, 단수, 자연재해 등 비정상상태의 용수 공급성 및 신뢰성을 확보하지 못하는 설계안이 될 수 있다.

이에 본 연구에서는 관망은 정상상태 뿐만 아니라, 비정상상태의 공급성을 최대화하기 위하여 수리해석 수행결과 각 절점의 필요수두 (압력 제약조건) 이상의 여유수두의 합을 최대화함으로 비정상상태를 대비한 안전 설계를 만족시킬 수 있다. (Tanylmboh and Templeman, 2000)

$$I = \sum_{j=1}^{n} (h_j - h_j^l) \quad for\ all\ j = 1, 2, ..., n \tag{4}$$

여기서,

I =절점의 여유수두 합

h_j =수리해석 결과 절점 j 의 수두

h_j^l =절점 j 의 필요수두

3.2 수리학적 제약조건 및 벌점함수

본 연구에서는 수리학적 제약조건 중 압력조건만을 사용하여 상수도 관망 설계 수행하며, 만약 최적설계의 수리해석과정에서 각 절점의 압력이 압력조건을 만족하지 못하면 벌칙상수인 α 에 큰 값을 주어 벌점을 발생시킨다. 이 벌점을 통해 목적함수의 함수값에 영향을 주어 선택되지 않게 한다. 만약 압력조건에 근접하게 미달할 경우를 벌점의 크기가 작아 최적해의 선택에 영향을 주지 않게 될 경우를 대비하여 β 를 크게하여 벌점을 크게 발생시킨다.

$$P_i = \alpha\left(\left|h_i - h_{\min}\right| or \left|h_{\max} - h_i\right|\right) + \beta \tag{5}$$

여기서,

P_i : 벌칙함수 (Penalty function)

h_i : 각 절점의 압력수두 (m)

$h_{\min}$: 최소압력수두 (m)

$h_{\max}$: 최대압력수두 (m)

α, β : 벌칙상수

3.3 모형의 흐름도

본 모형은 관경 설정, 제약조건 확인, 수리해석 등 반복적인 수행을 통해 최적해를 도출한다. Fig. 3은 본 모형의 흐름을 나타낸다. 먼저 최적설계를 수행할 관망의 정보를 얻는다. 이후 MOHS를 이용하여 최적설계를 수행한다. 이때 해당 관망에 적합한 압력조건을

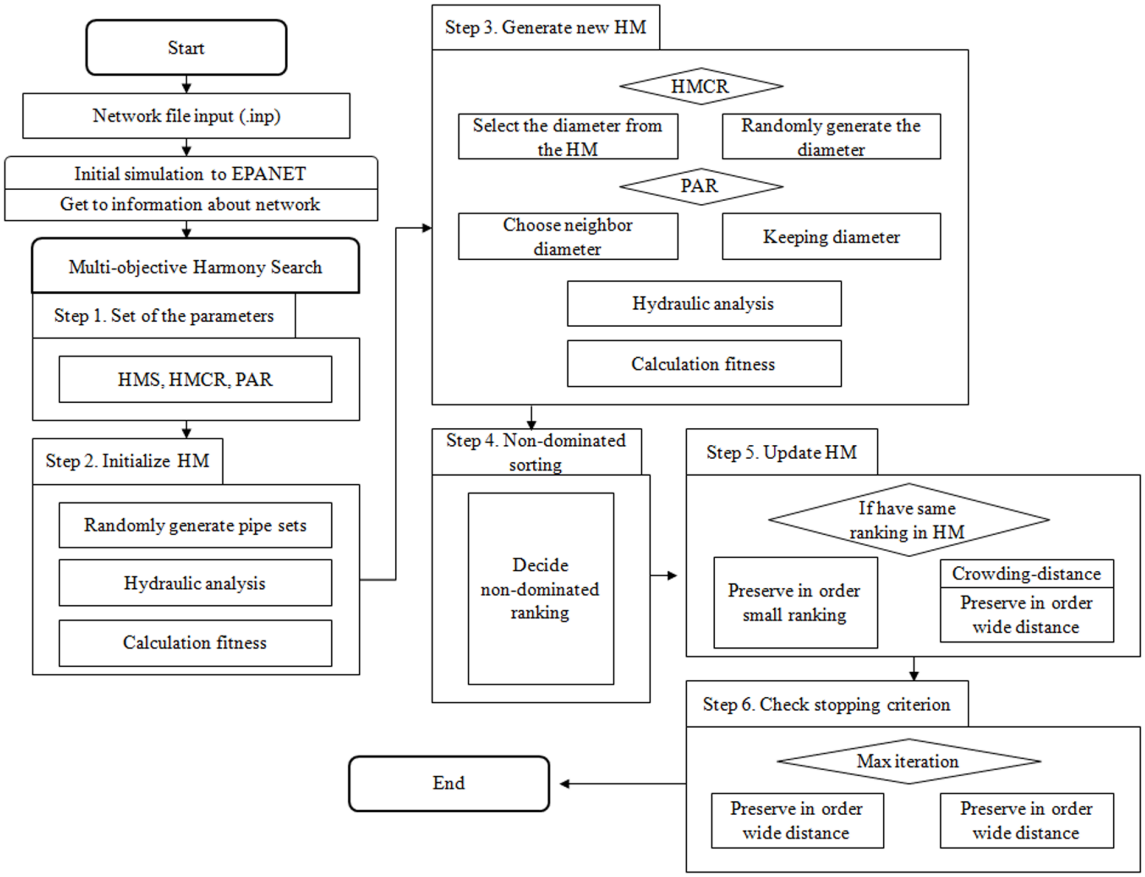

Fig. 3. The flowchart of the model.

결정하여 조건에 맞지 않는 경우 벌점함수를 통하여 도태되도록 한다. 반복계산횟수가 늘어날수록 보다 좋은 해가 도출되도록 HMCR과 PAR을 적용한다. 미리 지정된 최대반복횟수를 만족하면 계산을 멈추고 가장 좋은 해 집합을 최적해로 도출한다.

4. 적용 및 결과

본 연구에서는 상수도 관망 최적설계 문제를 해결하기 위해 기존연구의 많은 적용 사례를 갖고 있는 베트남 Hanoi 관망과 실제 대규모 관망인 경기도 P시 상수도 관망을 본 연구에서 제안하는 MOHS와 다목적 최적설계 문제를 해결하기 위해 많이 사용된 Non-dominated Sorting Geneiic Algorithm (NSGAII)에 적용하여 결과를 비교 분석하였다.

4.1 베트남 Hanoi 관망

Fig. 4와 같은 베트남 Hanoi 관망은 Fujiwara and Khang (1990)에 의해 제안된 관망으로 3개의 폐합회로, 1개의 저수지, 32개의 수요절점, 34개의 관로로 구성되어있으며, 모든 관로의 Hazen-Williams 조도 계수는 130이며, 각 절점의 최소수두는 30m이다. 베트남 Hanoi 관망은 총 6가지 상업용 관경이 사용되고 있으며 Table 1은 관경에 대한 길이 당 가격을 의미한다.

Table 1. Cost data for the Hanoi network (Fujiwara and Khang 1990)

Diameter (mm)	Cost ($/m)
304.8	45.7
406.4	70.4
508	98.4
609.6	129.3
762	180.7
1,016	278.3

베트남 Hanoi 상수도 관망 최적설계에 적용한 MOHS의 매개변수로서 HMS는 30～100, HMCR은 0.8～0.95, PAR은 0.05～0.2으로 각각 변화하면서 최적설계를 수행하였으며 최대 반복계산횟수는 500,000회로 제한하여 구동하였다. 위와 같이 각각의 매개변수를 변화하여 도출된 최적솔루션들의 수렴성과 다양성을 비교하여 최종매개변수를 결정하였다. 이때 본 연구에서는 Deb (2001)에서 제시한 파레토 프런트 비교기법을 적용하였다. 이 기법은 서로 다른 시뮬레이션을 통해 얻은 최종적인 비지배해의 조합인 파레토 프런트를 각각 합하여 다시 최종 비지배해를 결정하고, 결정된 비지배해 중에 각각의 시뮬레이션의 솔루션이 포함하고 있는 비율을 결정하게 되고, 그 중 가장 높은 비율을 포함하고 있는 시뮬레이션이 가장 우수한 수렴성을 가진다는 것이다. 이 기법을 적용하여 최종 매개변수 조합을 결정하였으며 그 결과는 Table 2와 같다.

또한 본 연구에서는 최적설계 문제에 2가지의 시나리오로 구분하여 적용하였다. 각각의 시나리오는 상수도 관망 설계 인자 중 서로 상충관계가 있는 2개의 설계인자를 고려하여 최적설계를 수행하였다. 시나리오 1은 신뢰도를 최대한 만족하면서 설계비용이 최소가 될 수 있도록 하였고, 시나리오 2는 각 절점의 여유수

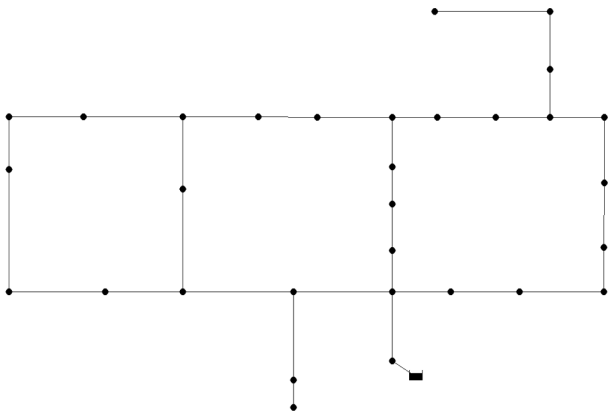

Fig. 4. Hanoi network.

Table 2. Parameters for Hanoi network

MOHS	HMS	HMCR	PAR	NI	NFEs	DV	PD	Search space size
	50	0.95	0.05	500,000	500,000	34	6	2.87×10^{26}
NSGA II	P	C	M	NI	NFEs	DV	PD	Search space size
	50	0.7	0.1	10,000	500,000	34	6	2.87×10^{26}

이 표에서, NI는 number of iteration, NFE는 number of function evaluations, DV는 decision variables, PD는 number of pipe diameter options, P는 Population size, C는 Crossover rate, M은 Mutation rate를 의미한다.

두 합을 최대로 만족하면서 설계비용이 최소로 할 수 있는 다목적 최적설계를 수행하였다. 또한 이때 제한조건으로 최소 수압조건을 측정하기 위해 EPANET 수리해석 프로그램을 연동하여 수압조건이 부합하는지 확인하였으며, 시나리오 별 결과는 Fig. 5, 6과 같다.

Fig. 5는 설계비용 최소화와 상수도 관망 신뢰도 최대화를 목적으로 하였을 경우 최적설계 결과를 나타낸다. Fig. 5와 같이 약 $ 6,355,021와 $ 10,769,857 사이의 최소비용에서 약 0.1377에서 0.2089 사이의 시스템 신뢰도 값이 골고루 분포하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 6은 설계비용 최소화와 절점의 여유수두 합

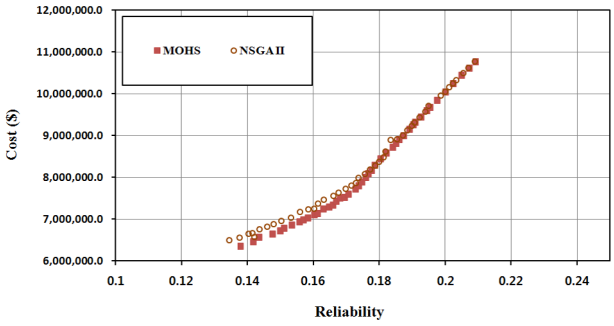

Fig. 5. The result of scenarios 1 for Hanoi network.

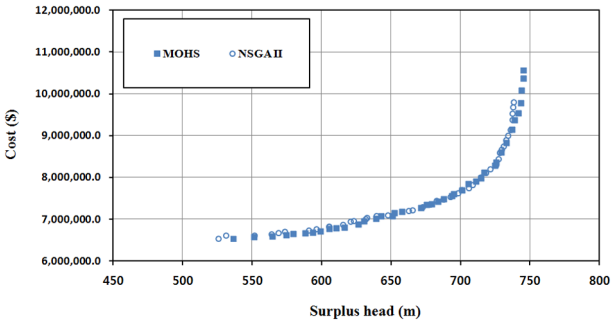

Fig. 6. The result of scenarios 2 for Hanoi network.

최대화를 목적으로 하였을 경우 결과를 나타낸다. Fig. 6과 같이 약 $ 6,541,799 ~ 10,570,725 의 최소비용 범위에서 약 536.6 ~ 745.3 m 의 여유수두의 합이 분포한다.

Table 3의 결과를 통해 시나리오 1과 시나리오 2에서 MOHS의 수렴성과 다양성이 NSGA II 보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 시나리오 1의 경우 비지배해의 비율이 MOHS가 68.3%로 NSGA II 보다 약 2배이상의 높은 비지배해 비율을 갖고 있어 수렴성이 우수하며, 파레토 프런트의 양극값의 거리차이도 MOHS가 NSGA II 보다 약 3.3% 큰 것으로 다양성 측면에서도 NSGA II 보다 우수함을 증명한다. 또한 시나리오 2의 경우에는 MOHS가 67.2%로 NSGA II보다 약 2배이상의 높은 비지배해 비율을 갖고 있어 수렴성이 우수하며, 파레토 프런트의 양극값의 거리차이도 MOHS가 NSGA II 보다 약 0.5% 큰 것으로 다양성 측면에서도 NSGA II 보다 우수함을 증명한다.

4.2 경기도 P시 소블록 상수도 관망

Fig. 7과 같은 경기도 P시 상수도 관망은 708개 관로와 645개의 절점, 2개의 펌프, 1개의 저수지로 구성되어 있다. 손실수두 산정은 Hazen-Williams 방법을 사용하였으며, 관로의 조도 계수는 90~110의 분포를 보인다. 각 절점의 최소수두 조건은 상수도 시설설계기준의 잔류수압기준인 $1.5\,kg \cdot cm^2$ 을 적용하여 15m이다. 경기도 P시 상수도 관망은 총 11가지 상업용 관경이 사용될 수 있다고 가정 (Geem, 2006) 하였으며, Table 4는 관경에 대한 길이 당 가격을 제시하였다.

경기도 P시 상수도 관망 최적설계의 매개변수로서 HMS는 50~150, HMCR은 0.9~0.99, PAR은 0.01~0.1

Table 3. The result of design optimization for Hanoi network

Algorithm		Scenario 1		Scenario 2	
		MOHS	NSGA II	MOHS	NSGA II
Cost($)	Min	6,355,021	6,502,070	6,541,799	6,547,777
	Max	10,769,857	10,769,857	10,570,725	9,814,944
Reliability	Min	0.1377	0.1344	-	-
	Max	0.2089	0.2089	-	-
Surplus head (m)	Min	-	-	536.6	525.9
	Max	-	-	745.3	738.4
Non-dominated solution rate (%)		68.3	31.7	67.2	32.7

Table 4. Cost data for P city network (Geem 2006)

Diameter (mm)	Cost (₩/m)	Diameter (mm)	Cost (₩/m)
50	36,766	300	62,109
80	37,890	500	108,492
100	38,933	600	140,387
150	42,554	800	221,582
200	47,624	1,000	325,985
250	54,125		

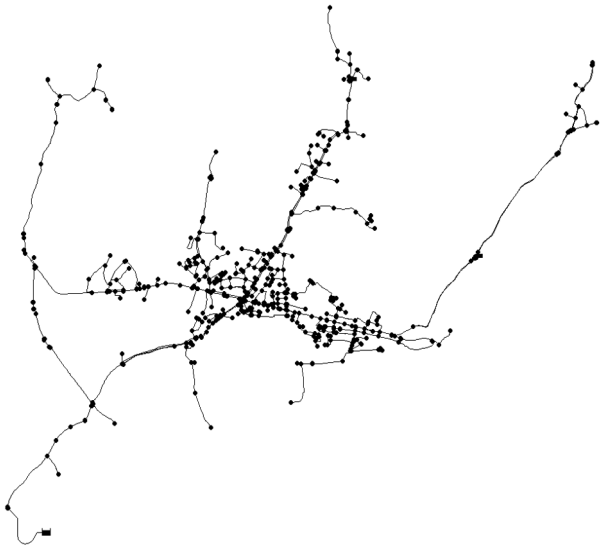

Fig. 7. P city network.

으로 각각 변화하면서 최적설계를 수행하였으며 최대 반복계산횟수는 1,000,000회로 제한하여 구동하였다. 각각의 매개변수 중 최종 매개변수 조합을 결정하였으며 그 결과는 Table. 5와 같다.

또한 경기도 P시 상수도 관망 역시 2가지 시나리오로 구분하여 최적설계를 수행하였다. 시나리오 1은 최소 설계비용과 최대 신뢰도를 고려하였으며, 시나리오 2는 최소 설계비용과 각 절점의 여유수두 합을 최대로 만족하도록 하여 다목적 최적설계를 수행하였다. 제한조건으로 최소 수압조건을 측정하기 위해 EPANET 수리해석 프로그램을 연동하였으며, 시나리오별 결과는 Fig. 8, 9와 같다.

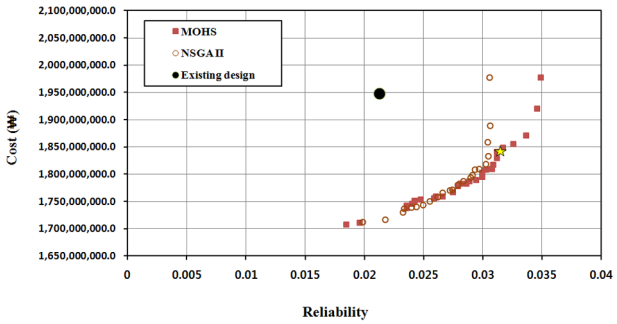

Fig. 8. The result of scenarios 1 for P city network.

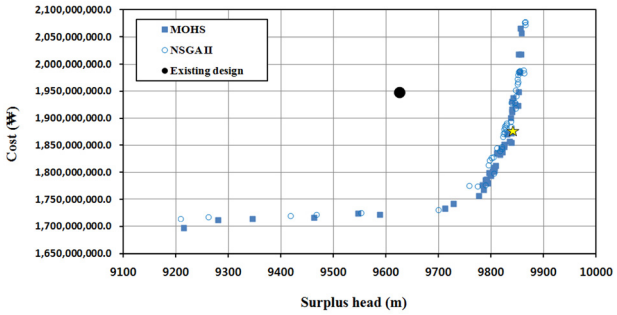

Fig. 9. The result of scenarios 2 for P city network.

Fig. 8은 설계비용 최소화와 상수도 관망 신뢰도 최대화를 목적으로 하였을 경우 최적설계 결과를 나타낸다. Fig. 8과 같이 약 1,708,071,168 원과 1,977,747,072 원 사이의 최소비용에서 약 0.0184에서 0.0348 사이의 시스템 신뢰도 값이 골고루 분포하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 9는 설계비용 최소화와 절점의 여유수두 합 최대화를 목적으로 하였을 경우 결과를 나타낸다. Fig. 9와 같이 약 1,697,877,504 ~ 2,066,816,128 원의 최소비용 범위에서 약 9,213.9 ~ 9,856.9 m 의 여유수두의 합이 분포한다.

Table 6의 결과를 통해 시나리오 1과 시나리오 2에서 MOHS의 수렴성과 다양성이 NSGA II보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 시나리오 1의 경우 비지배해의 비율이 MOHS가 70.9%로 NSGA II보다 약 2배이상의 높은 비지배해 비율을 갖고 있어 수렴성이 우수하며, 파레토 프런트의 양극값의 거리차이도 MOHS가 NSGA II보다 약 15.4% 큰 것으로 다양성측면에서도

Table 5. Parameters for P city network

MOHS	HMS	HMCR	PAR	NI	NFEs	DV	PD	Search space size
	100	0.99	0.01	1,000,000	1,000,000	708	11	2.02×10737
NSGA II	P	C	M	NI	NFEs	DV	PD	Search space size
	100	0.7	0.1	10,000	1,000,000	708	11	2.02×10737

NSGA II보다 우수함을 증명한다. 시나리오 2의 경우 비지배해의 비율이 MOHS가 67.7%로 NSGA II보다 약 2배 이상의 높은 비지배해 비율을 갖고 있어 수렴성이 우수하지만, 파레토 프런트의 양극값의 거리차이는 NSGA II가 MOHS보다 약 0.7% 큰 것으로 다양성 측면에서는 MOHS보다 근소하게 우수한 결과를 나타낸다.

최적화 수행 결과는 Fig. 8과 Fig. 9와 같으며, 두 가지의 시나리오는 [최대 vs 최소] 문제이므로 파레토프런트가 오른쪽하단에 인접할수록 우수한 결과를 나타낸다. Fig. 8의 시나리오 1에서 설계비용은 기존설계안(의 결과 (설계비용: 19.47 억 원, 신뢰도: 0.021, 여유수두 합: 9626.4 m)보다 향상된 결과를 얻었다. 최적화된 결과 중 특히 별모양 (☆)은 최적해 중 하나를 나타내며, 기존설계안과 비교할 때 설계비용은 2.071 % 절감하였고, 신뢰도는 8.131% 향상되었다. 또한 시나리오 2의 경우 도출된 최적 설계안 중 별모양은 설계비용에서 6.103%, 여유수두 합은 2.235% 향상된 결과를 보여준다. 이는 2가지 목적함수를 동시에 고려하였을 때 시나리오 1과 2의 최적설계안 중에 어떤 설계안을 선택하든지 기존 설계안 보다 우수한 설계임을 나타낸다. Table 7은 최적설계안의 관경의 구성 비율을 나타내고 있으며, 시나리오 1과 2에서 최적설계 결과 중 별모양 (☆)과 같이 기존설계 안에 비해 감소된 비용과 증가된 신뢰도, 증가된 여유수두 합을 얻었

Table 6. The result of design optimization for P city network

Algorithm		Scenarios 1		Scenarios 2	
		MOHS	NSGA II	MOHS	NSGA II
Cost (₩)	Min	1,708,071,168	1,700,283,136	1,697,877,504	1,715,444,224
	Max	1,977,747,072	1,978,163,712	2,066,816,128	2,079,338,240
Reliability	Min	0.0184	0.0198	-	-
	Max	0.0348	0.0306	-	-
Surplus head (m)	Min	-	-	9,213.90	9,208.20
	Max	-	-	9,856.90	9,864.20
Non dominated solution rate (%)		70.9	29.1	67.7	32.3

Table 7. Diameter configuration table for P city network

Existing design		Optimum design (Scenarios 1 ★)		Rate of change (%)	Optimum design (Scenarios 2 ★)		Rate of change (%)
Pipe Dia. (mm)	% $(L_i/\sum_{i=1}^{n} L_i)$	Pipe Dia. (mm)	% $(L_i/\sum_{i=1}^{n} L_i)$		Pipe Dia. (mm)	% $(L_i/\sum_{i=1}^{n} L_i)$	
50	8.48	50	0.93	-7.56	50	18.05	+9.57
80	10.03	80	3.24	-6.79	80	18.98	+8.95
100	6.94	100	5.40	-1.54	100	14.97	+8.03
150	7.71	150	14.04	6.32	150	11.88	+4.17
200	8.02	200	20.53	12.50	200	8.49	+0.46
250	7.56	250	22.07	14.50	250	7.87	+0.31
300	11.11	300	20.53	9.41	300	8.49	-2.62
500	9.72	500	6.02	-3.70	500	3.86	-5.86
600	9.11	600	4.63	-4.47	600	4.78	-4.32
800	10.80	800	2.47	-8.33	800	2.16	-8.64
1000	10.49	1000	0.16	-10.34	1,000	0.46	-10.03
Cost (108 ₩)	19.47	Cost (108 ₩)	18.46	-2.071	Cost (108 ₩)	18.728	-6.103
Reliability	0.021	Reliability	0.032	+8.131	Reliability	-	
Surplus head (m)	9,626.4	Surplus head (m)	-		Surplus head (m)	9,846.6	+2.235

을 때, 관경 분포는 300mm 이하인 관은 증가된 반면, 300mm 이상인 관의 구성 비율은 감소했다는 것을 알 수 있다. 이는 기존설계안의 최소수두인 15m를 만족하지 않는 절점의 개수가 128개, 30m를 넘는 절점의 개수가 58개로 기존설계안의 관로분포가 적절하기 이루어지지 않았다는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 Table 7. 최적설계안의 결과에서는 모든 절점에서 최소수두 15m를 만족하여 적절한 관로분포를 통해 최적설계를 도출하였다.

5. 결 론

본 연구는 다목적함수에 따른 상수도 관망 최적 설계문제를 2가지 시나리오를 통해 관망 내 비용최소화 문제와 신뢰도 최대화, 여유수두 합 최대화에 대해 최적 설계안을 제시하였고 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

베트남 Hanoi 관망은 이전 연구로부터 비용최적화에 관한 Global optimal cost ($ 6,080,821)를 알 수 있다. 이에 본 연구에서 다목적 최적화를 적용 하였을 때, 비용최소화만을 고려한 최적설계 보다 비용적인 측면에서 3.07 % ~ 9.38% 증가된 비용을 나타내었지만, 2가지 목적을 동시에 고려하여 실용적 측면에서는 최적의 설계안을 도출하였다고 판단된다. 또한 경기도 P시의 실제 상수도 관망의 경우에는 다목적 최적설계시 기존 설계안에서 설계비용, 신뢰도, 여유수두 합 등을 수리학적 제약조건 (절점의 수압)을 만족시키는 범위 내에서 향상 시킬 수 있는 최적설계안을 도출하였다. 이러한 결과를 통하여 의사결정자는 주어진 예산과 예상하는 신뢰도, 여유수두 합 등의 여러 가지 요건을 고려하였을 때, 적합하다고 판단되는 최적설계안을 선택할 수 있도록 지원해주는 역할을 한다. 즉 제한된 예산안에서 최대신뢰도를 선택할 것인가, 또는 목표로 하는 신뢰도와 여유수두 합을 고려할 때 예산 책정은 어떻게 해야 할 것인가 등에 대한 여러 가지 방안들을 제시하고 있다. 본 연구에서는 3가지의 설계인자를 고려한 상수도 관망 최적설계를 수행하였다. 향후 연구에서는 보다 다양한 관망설계 기준으로의 확장이 가능하며, 고정시간모의의 수리학적 설계뿐만 아닌 확장기간모의 (Extended period simulation)를 통해 펌프운영비용, 수질조건도 최적으로 만족시켜 실무 적용 강화를 위한 설계가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “차세대 EI사업 (GT-11-G-02-001-2)”의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사 드립니다.

References

Alperovits, E., and Shamir, U. (1977). Design of optimal water distribution systems. Water resources research, 13(6), 885-900.

Ayvaz, M. T. (2007). Simultaneous determination of aquifer parameters and zone structures with fuzzy c-means clustering and meta-heuristic harmony search algorithm. Advances in Water Resources, 30(11), 2326-2338.

Chiplunkar, A. V. (1986). Looped water distribution system optimization for single loading. Journal of Environmental Engineering, 112(2), 264-279.

Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. Lecture notes in computer science, 1917, 849-858.

Deb, K. (2001). Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, 16, 315-338.

El-Bahrawy, A. N., and Smith, A. A. (1987). A methodology for optimal design of pipe distribution networks. Canadian Journal of Civil Engineering, 14(2), 207-215.

El-Bahrawy, A., and Smith, A. A. (1985). Application of MINOS to water collection and distribution networks. Civil Engineering Systems, 2(1), 38-49.

Fonseca, C. M., and Fleming, P. J. (1993). Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: FormulationDiscussion and Generalization. In ICGA, 93, 416-423.

Fujiwara, O., and Khang, D. B. (1990). A two phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. Water resources research, 26(4), 539-549.

Geem, Z. W., Kim, J. H., and Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. Simulation, 76(2), 60-68.

Geem, Z. W. (2005). Harmony search in water pump switching problem. In Advances in Natural Computation (pp. 751-760). Springer Berlin Heidelberg.

Geem, Z. W. (2006). Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. Engineering Optimization, 38(03), 259-277.

Geem, Z. W. (2007). Optimal scheduling of multiple dam system using harmony search algorithm. In Computational and Ambient Intelligence (pp. 316-323). Springer Berlin Heidelberg.

Gessler, J., and Walski, T. M. (1985). Water Distribution System Optimization (No. WES/TR/EL-85-11). Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Environmental Lab.

Goldberg, D.E (1989). Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, MA.

Holand, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor: The University of Michigan Press.

Jung, D. H., Chung, G. H and Kim, J. H. (2010). Optimal design of water distribution system considering the uncertainties on the demands and roughness coefficients. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 10(1), 73-80.

Kim, J. H., Geem, Z. W., and Kim, E. S. (2001). Parameter Estimation Of The Nonlinear Muskingum Model Using Harmony Search.

Kim, J. W. (2013). A study on optimal design of network using multi-objective genetic algorithm in water distribution system. Master's Thesis, Univ. of Seoul.

Lansey, K. E., and Mays, L. W. (1989). Optimization model for water distribution system design. Journal of Hydraulic Engineering, 115(10), 1401-1418.

Lee, K. S., and Geem, Z. W. (2004). A new structural optimization method based on the harmony search algorithm. Computers and Structures, 82(9), 781-798.

Lee, K. S., Geem, Z. W., Lee, S. H., and Bae, K. W. (2005). The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization. Engineering Optimization, 37(7), 663-684.

Mandl, C. E. (1981). A survey of mathematical optimization models and algorithms for designing and extending irrigation and wastewater networks. Water resources research, 17(4), 769-775.

Monbaliu, J., Jo, J., Fraisse, C. W., and Vadas, R. G. (1990). Computer aided design of pipe networks. status: published.

Ormsbee, L. E., and Contractor, D. N. (1981). Optimization of hydraulic networks. In International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics, and Sediment Control, Kentucky, Lexington, KY, 255-261.

Quindry, G. E., Liebman, J. C., and Brill, E. D. (1981). Optimization of looped water distribution systems. Journal of the Environmental Engineering Division, 107(4), 665-679.

Shamir, U., and Howard, C. D. (1968). Water distribution systems analysis.

Shamir, U. (1974). Optimal design and operation of water distribution systems. Water resources research, 10(1), 27-36.

Simpson, A. R., Dandy, G. C., and Murphy, L. J. (1994). Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. Journal of Water Resources Planning and Management, 120(4), 423-443.

Su, Y. C., Mays, L. W., Duan, N., and Lansey, K. E. (1987). Reliability-based optimization model for water distribution systems. Journal of Hydraulic Engineering, 113(12), 1539-1556.

Tanylmboh, T. T., and Templeman, A. B. (2000). A quantified assessment of the relationship between the reliability and entropy of water distribution systems. Engineering Optimization, 33(2), 179-199.