ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 4, pp. 413-428, August, 2013
http://dx.doi.org/10.11001/jksww.2013.27.4.413

Field Application of Least Cost Design Model on Water Distribution Systems using Ant Colony Optimization Algorithm

개미군집 최적화 알고리즘을 이용한 상수도관망 시스템의 최저비용설계 모델의 현장 적용

Sanghyuk Park[1] · Hongsoon Choi[2] · Jayong Koo[1*]

박상혁[1] · 최홍순[2] · 구자용[1*]

[1]University of Seoul · [2]Korea Water and Wastewater Works Association

[1]서울시립대학교 환경공학부 · [2]한국상하수도협회

Abstract : In this study, Ant Colony Algorithm(ACO) was used for optimal model. ACO which are metaheuristic algorithm for combinatorial optimization problem are inspired by the fact that ants are able to find the shortest route between their nest and food source. For applying the model to water distribution systems, pipes, tanks(reservoirs), pump construction and pump operation cost were considered as object function and pressure at each node and reservoir level were considered as constraints. Modified model from Ostfeld and Tubaltzev(2008) was verified by applying 2-Looped, Hanoi and Ostfeld' s networks. And sensitivity analysis about ant number, number of ants in a best group and pheromone decrease rate was accomplished. After the verification, it was applied to real water network from S water treatment plant. As a result of the analysis, in the Two-looped network, the best design cost was found to $419,000 and in the Hanoi network, the best design cost was calculated to $6,164,384, and in the Ostfeld' s network, the best design cost was found to $3,525,096. These are almost equal or better result compared with previous researches. Last, the cost of optimal design for real network, was found for 66 billion dollar that is 8.8 % lower than before. In addition, optimal diameter for aged pipes was found in this study and the 5 of 8 aged pipes were changed the diameter. Through this result, pipe construction cost reduction was found to 11 percent lower than before. And to conclusion, The least cost design model on water distribution system was developed and verified successfully in this study and it will be very useful not only optimal pipe change plan but optimization plan for whole water distribution system.

Key words : ACO, Least Cost Design, Water distribution system, Water distribution networks analysis
주제어 : 개미군집 최적화, 최저비용설계, 상수도관망 시스템, 관망해석

1. 서 론

상수도 시스템에서 관망 설계는 계획, 설계 및 분석단계를 통하여 결정되는데, 기존의 실무에서 상수도 관망설계는 설계기준에 의해서 Hardy-Cross 방법에 의한 시행착오법을 이용하여, 수리계산을 만족하기 위해 많은 시간과 노력이 필요하였으며, 이렇게 실시한 설계가 최적이라고 판단하기는 어려웠다. 물의 효율적인 분배와 막대한 공사비용의 절감을 위해서는 계획 및 설계 단계에서 최적 방안을 선정할 수 있는 최적화 기법의 도입이 필요하며, 이러한 문제점을 극복하기 위하여 상수도의 최적설계에 관한 연구가 진행되어 왔다.

상수관망의 최적설계에 관한 연구는 초기에 선형계획법(Linear Programming)과 동적계획법

• Received 13 March 2013, revised 8 August 2013, accepted 9 August 2013.
* Corresponding author: Tel : +822-6490-2866 Fax : +822-6490-2859 E-mail : jykoo@uos.ac.kr

(Dynamic programming) 등의 기법을 이용하여 이루어졌다(Schaake 등, 1969). 이러한 초기의 상수관망 연구는 주로 자연유하식 배수시스템을 대상으로 하였으며, 수지상식 관망만을 대상으로 하여 당시 대도시에 설치되었던 망목식 배수관망에 적용하는데 어려움이 있었다.

이후 망목식 배수관망을 대상으로 수리학적 모델과 더불어 선형계획법, LPG(Linear Programing Gradient, 선형경사탐색법) 등의 기법을 이용하여 연구 되었으며(Alperovits와 Shamir, 1977; Quindry 등, 1981; Morgan과 Goulter, 1985), 이외에도 상수도 관망의 최적설계에 대한 많은 연구가 계속해서 이루어져 왔다. 그러나 상수관망의 최적설계를 위해서는 고려해야할 설계인자가 다양하고 조합해야할 경우의 수가 상당히 많기 때문에 기존의 수학적 기법뿐만 아니라 메타휴리스틱기법을 이용한 연구도 진행되어 왔다. 메타휴리스틱(Meta-heuristic)기법은 1990년대 초반부터 상수도 관망에 적용 되었으며 주로, 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm), 담금질 기법, 진화설계(Evolutionary Design) 알고리즘 등을 이용한 연구가 주로 진행되어 왔다(Cembrowicz, 1992; Simpson 등, 1994; Dandy 등, 1996; Savic과 Walter, 1997; Gupta 등, 1999; Morely 등, 2001; Vairamoorthy와 Ali, 2005; Van Dijk 등, 2008, Loganathan 등, 1995; Cunha와 Sousa, 1999). 이밖에도 Eusuff와 Lansey(2003), Liong와 Atiquzzaman(2004), Geem(2006), Vasan과 Simonovic (2010)은 각각 SFLA(Shuffled Frog Leaping Algorithm), SCE(Shuffled Complex Evolution), HS(Harmony Search), DE(Differential Evolution)기법을 이용하여 배수관망의 최적배치와 최소비용관경을 도출하는 모델을 제안하였다.

또한 최근 개미의 먹이탐색과정을 모방한 개미군집 최적화 알고리즘이 조합 최적화 문제에 성능이 입증됨으로써 Maier 등(2003)은 중력식 배수관망을 대상으로 배수관망의 최적관경을 제안하는 모델을 개발하였으며, Osffeld와 Tubaltzev(2008)은 펌프에 의해 가압이 되는 배수관망을 대상으로 Maier 등(2003)이 제시한 알고리즘을 수정하여 배수시스템의 최소비용설계를 위한 최적 관경과 펌프최대전력을 제안하는 모델을 개발하였다.

한편, 국내 상수도시설은 공급의 안전성을 위해 필요 이상으로 과대 설계되거나 공장 폐수와 생활 오수 등의 하천 오염화로 인하여 취수원이 제한되어 상수도 시스템의 대규모화가 이루어져 왔다(Ko 등, 1992). 대규모 시설은 효율성에도 문제가 될 수 있으며, 공급의 안정성과 비상시 여유율을 만족시키는 범위 내에서 적절한 설계인자를 제시하는 것이 중요하며, 국내 상수도 시설에 적합한 설계모델의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 상수관 뿐만 아니라 펌프의 운영 측면을 고려한 Osffeld와 Tubaltzev(2008)의 연구에서 제시한 개미군집 최적화 모델을 수정 및 보완하여, 국내 상수도 시설에 적용하고자 한다. 모델의 수정 및 보완은 선택할 수 있는 모든 설계인자들의 조합을 탐색공간으로 하여 확률적 기반으로 빠르고 정확한 최저비용 솔루션을 도출하고자 하였으며, 선행연구결과와 비교하여 모델을 검증함으로써 개발된 모델의 효용성을 확인하고자 한다.

2. 개미 군집 최적화

개미 군집 최적화는 개미들의 행동에 대한 매커니즘을 응용한 기법으로서 개미들이 정보를 교환할 때 사용하는 페로몬(Pheromone)을 이용하는 방법을 적용한 메타휴리스틱이다. 그 기본 원리는 에이전트라 불리는 개미들이 먹이를 찾아 이동할 때, 개미들이 이동한 경로에 페로몬을 분비하고, 다음에 지나가는 개미는 페로몬 흔적(Pheromone Trail)을 이용해 다음 이동 경로를 선택한다. 이때 자주 이용되는 경로는 페로몬이 축적되고, 이용되지 않는 경로는 페로몬

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 4, pp. 413-428, August, 2013

이 감소하게 된다. 이렇게 축적된 페로몬 정보를 바탕으로 구성된 경로는 최적의 경로일 확률이 높기 때문에 이를 해로 산출하게 된다(Hong 등, 2010). 개미 군집 최적화 기법을 이용한 상수관망 최적 설계에 관한 주요 연구로는 Maier 등(2003)이 처음으로 중력식 배수관망을 대상으로 배수관망의 최적관경을 제안하는 모델을 제안하였으며, 이후 Osffeld와 Tubaltzev(2008)은 펌프에 의해 가압이 되는 배수관망을 대상으로 Maier 등(2003)이 제시한 알고리즘과 파라미터를 수정하여 배수시스템의 최소비용설계을 위한 최적 관경과 펌프최대전력을 제안하는 모델을 개발하였다.

Osffeld와 Tubaltzev(2008)의 연구에서는 Bullnheimer 등(1997)이 제시한 ASrank를 기반으로 우수한 해에 대하여 평가하고 차등적으로 확률을 업데이트하는 방식을 이용하였다. 하지만, 이러한 방식은 순위별 차등적 갱신이 되기 때문에 중복해가 발생하는 경우 페로몬 업데이트가 중복될 수 있어 확률 갱신 규칙에 위배될 가능성이 있다.

본 연구에서는 Osffeld와 Tubaltzev(2008)이 제안한 개미군집 최적화 모델을 기반으로 하여 각 개미가 생성한 해를 모두 저장하여 비교를 한 뒤 중복되는 해는 하나만 남기는 메카니즘을 추가하였다. 이를 통해 지역적 최적점에 빠질 가능성을 최소화 하여 더 광범위한 탐색공간을 확보할 수 있도록 하였다. 또한 확률 업데이트 과정에 낮은 비용의 솔루션일수록 높은 강도의 페로몬이 유지되기 때문에 즉, 최적의 해를 탐색하는 과정에서 설계 비용이 낮을수록 상수관망에서의 설계인자의 제한조건을 고려하기 어려울 수 있으므로 본 연구에서는 설계인자의 제한조건을 고려하기 위해 Eq.(1)와 같이 페널티 비용을 수정하였다.

$$C_{k'}(t)' = C_{k'}(t) + PPC + QPC + LPC \quad \text{Eq.(1)}$$

여기서,

$C_{k'}(t)'$: t번째 개미군단에서 k'번째 개미의 솔루션 비용(원)

k': 제한조건을 만족하지 못한 개미

PPC : 수두조건에 대한 페널티 비용 (Pressure penalty cost, 원)

QPC : 유량조건에 대한 페널티 비용 (Quantity penalty cost, 원)

LPC : 수위조건에 대한 페널티 비용 (Level penalty cost, 원)

페널티 비용은 각 제한조건마다 따로 계산되어 솔루션 비용에 합해지며, 그 계산방법은 Eq.(2) ~ Eq.(4)와 같다.

$$PPC = \max\left[(H'_{i,j} - H_{\min}) + (H_{\max} - H''_{i,j})\right] \times PC, \quad \text{Eq.(2)}$$

$$(H'_{1,j} < H_{\min},\ H''_{1,j} > H_{\max}),\ (i = 1, \cdots, t)$$

여기서,

$H'_{i,j}$: i 시간대 j 절점에서 최소제한수두를 만족 못한 수두(m)

$H''_{i,j}$: i 시간대 j 절점에서 최대제한수두를 만족 못한 수두(m)

$H_{\min}$: 최소제한수두(m)

$H_{\max}$: 최대제한수두(m)

PC : 패널티 비용(penalty cost, 원)

$$QPC = \left(\sum_{i=1}^{T} Q'_{i,j} - V_j^{\max}\right) \times PC, \quad \text{Eq.(3)}$$

$$(Q'_{i,j} > V_j^{\max})$$

여기서,

$Q'_{i,j}$: 유량제한조건을 통과하지 못한 i시간대의 수요절점 j에서의 유량(m^3/hr)

$V_j^{\max}$: 공급절점에서의 공급 가능 수량(m^3)

$$LPC = \left|\left(\left|\triangle L_t^{\max}\right| / L_t^{initial}\right) - \varepsilon\right| \times PC \quad \text{Eq.(4)}$$

여기서,

$\Delta L_t^{\max}$: t 탱크에서의 0시와 24시의 수위차(m)

$L_t^{initial}$: t 탱크의 초기 수위(m)
ϵ : 배수지 수위변화 허용계수

위와 같이 페널티 비용을 부과하여 제한조건과 멀어진 솔루션일수록 더 많은 페널티 비용을 부과하게 하였으며, 이를 통해 개미들이 제한조건 범위를 만족하는 솔루션을 도출하도록 유도하였다.

3. 연구방법 및 대상

3.1 최저비용설계 모델의 개발

본 연구에서는 상수도관망 시스템의 최소비용설계 · 운영 모델을 개발하기 위하여 Osffeld와 Tubaltzev(2008)이 제안한 개미군집 최적화 모델을 이용하여 수정 및 보완하였으며, 본 연구에서 수정 · 보완한 상수관망의 최적설계 모델의 수행 과정을 Fig. 1에 도식화 하였다.

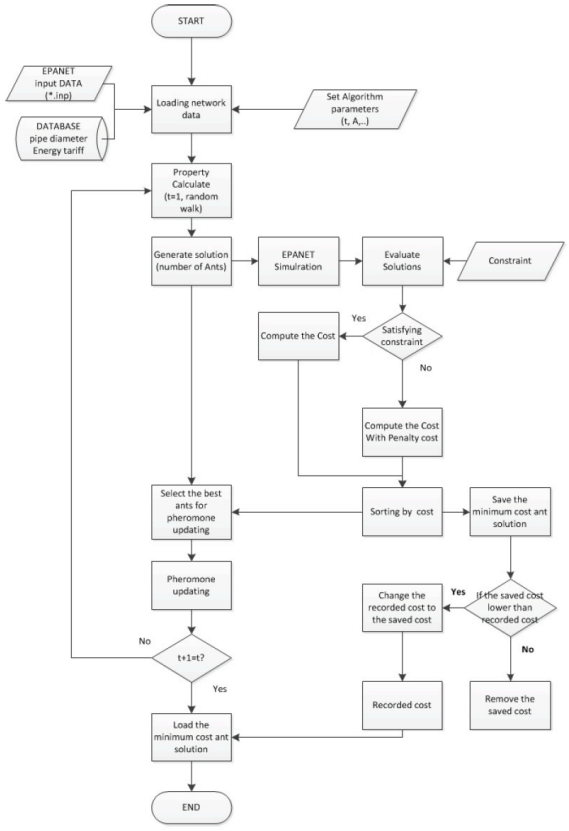


Fig. 1. Flow chart of the optimal model

상수관망의 최저비용설계를 위해서는 설계 인자인 관경, 배수지, 펌프와 운영 제한조건인 절점에서의 수압, 배수지에서의 수위 등을 고려해야 한다. 우선 관의 길이와 관경정보, 시간대별 에너지비용 등 선택옵션 데이터베이스를 모델에 로딩하고 개미 수, 반복횟수 등 알고리즘 파라미터들을 설정하도록 하였다. 첫 번째 반복 시에는 (t=1) 동일한 확률로 각 선택옵션을 고려하여 개미 수와 동일한 수의 솔루션이 도출되도록 하였으며, 도출된 각 솔루션은 미국 환경청에서 개발된 EPANET 2.0의 해석 엔진을 이용하여 수리학적 모의를 실시하여 결과를 출력하도록 하였다.

출력된 결과와 설정한 제한조건으로 각 해를 평가한 뒤 제한조건을 만족하는 해는 솔루션 비용을 계산하고, 제한조건을 만족하지 못한 해에 대해서는 솔루션 설계비용에 페널티 비용이 더해져 총 솔루션 비용이 계산되도록 하였다.

모든 솔루션의 비용 산정이 완료되면, 저가 순으로 솔루션을 정렬하고 가장 낮은 비용을 메모리에 저장한 뒤 지정한 우수그룹 순위 내에 포함된 솔루션에 대해서 새로 부여할 페로몬을 계산하고, 이를 이용하여 확률업데이트를 진행하도록 하였으며, 이와 같은 과정을 지정된 반복횟수에 도달할 때 까지 반복하도록 하였다.

여기서 각 반복횟수(t)마다 최저로 기록된 비용을 저장하게 되는데, 이때 미리 저장된(이전 반복횟수에서 저장된) 솔루션과 비교를 하여 더 저가 솔루션 1개만을 메모리에 저장하도록 하고, 모든 반복횟수가 완료되었을 때 이 메모리에 저장된 최저비용 솔루션을 호출하여 최적 솔루션으로 출력하게 된다. 완성된 모델은 기존에 연구된 검증관망을 이용해 유효성을 검증한 뒤 실제 연구대상지역에 적용하였다.

3.2 상수도관망 설계를 위한 비용 목적 함수 및 원단위 설정

최저비용설계인자의 조합을 위한 최적화 알

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 4, pp. 413-428, August, 2013

고리즘은 비용에 따라 해가 평가되기 때문에 비용목적함수의 설정이 중요하며, 제한조건을 만족시키는 범위 내에서 각 비용함수의 합이 최저가 되는 솔루션을 도출하는 것이다. 본 연구에서는 기존 연구에서의 설정한 목적함수를 이용하였다. 목적함수의 구성은 관 설치비용, 펌프 운전비용, 펌프 건설비용, 저수조 건설비용의 합이 최소가 되는 솔루션을 찾도록 설정하였으며, 각각의 입력 값은 연구대상지역에 적합하게 수정하여 적용하였다. 다음 Eq.(5)에 목적함수를 나타내었으며, Eq.(6) ~ Eq.(9)에 목적함수를 구성하고 있는 각각의 세부항목의 산정방법을 나타내었다.

$$Minimise(PCC + APOC + PUCC + TCC) \quad \text{Eq.(5)}$$

여기서,

PCC : 관 설치비용(Pipe Construction Cost, 원)

APOC : 펌프운전비용(Annual Pump Operation Cost, 원)

PUCC : 펌프건설비용(Pump Construction Cost, 원)

TCC : 저수조(배수지) 건설비용(Tank Construction Cost, 원)

연구대상이 되는 정수장 후단의 물 공급시스템에는 송수관 및 배수관, 펌프시설 그리고 배수지가 포함된다. 송수관의 경우 주로 대구경이 사용되므로 단위 길이 당 재료비 및 공사비용이 높아 시스템 전체의 설계 및 운영비용에서 관 설치비용이 차지하는 비중이 매우 크다. 따라서 정확한 최적 설계 및 운영인자를 제안하기 위해서는 우선 관 설치공사에 대해 현실적인 공사과정을 최대한 고려하여 비용을 산정하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서 적용한 관 설치비용은 크게 자재비와 공사비로 나누어 고려하였다. 자재비는 관 직경 당 자재단가를 고려하였고, 공사비로는 인력비 및 기계비, 터파기, 잔토처리, 되메우기 비용을 고려하였다. 터파기는 터파기표준도를 기준으로 하였으며, 기계비는 배관공과

Table 1. Pipe construction cost of the study network (cost unit: won/m)

Dia.(mm)	Pipe cost	Equipment cost	Excavation cost	Cost of removal of surplus soil	Refilling cost	Total
300	62,545	10,942	1,903	1,046	29,780	106,216
350	78,375	13,146	2,107	1,424	31,347	126,399
400	90,015	16,166	2,320	1,860	32,932	143,293
450	100,280	18,872	2,542	2,354	34,537	158,585
500	112,352	22,394	2,773	2,906	36,161	176,586
600	134,368	26,662	3,262	4,185	39,466	207,943
700	150,363	30,929	3,788	5,696	42,847	233,623
800	177,588	36,836	4,349	7,440	46,304	272,517
900	200,315	45,188	4,947	9,416	49,838	309,704
1,000	251,373	56,820	6,343	11,625	61,528	387,689
1,100	275,275	73,267	7,068	14,066	65,502	435,177
1,200	321,763	95,287	7,829	16,740	69,553	511,171
1,350	386,925	123,559	9,038	21,186	75,771	616,479
1,500	475,863	138,607	10,330	26,156	82,161	733,117
1,650	561,778	155,286	11,702	31,648	88,722	849,137
1,800	644,192	180,174	13,157	37,664	95,455	970,641
2,000	786,437	212,062	15,222	46,499	104,698	1,164,918
2,200	937,155	232,234	17,433	56,263	114,246	1,357,331
2,400	1,267,845	259,610	19,789	66,958	124,099	1,738,301

보통 인부의 인력비 그리고 트럭 탑재형 크레인 비용이 포함되었으며, 크레인은 관경 900 mm까지는 10 톤, 1,000 mm이상은 15 톤을 기준으로 하였으며, 최종 산정된 단위 길이 당 관 설치 비용은 Table 1와 같다.

$$PCC = \sum_{i=1}^{np} Z_i(d_i) + C_i(d_i) \quad \text{Eq.(6)}$$

여기서,
np : 전체 관의 수
Z_i : 관 i의 단위 길이 당 비용 (원/m)
C_i : 관 i의 단위 길이 당 공사비용(원/m)
d_i : 관 i의 직경(㎜)

펌프의 운영비용은 1년을 기준으로 하였으며, 순현재가치계수를 고려하여 펌프의 내구연한 동안 발생하는 총 운영비용을 펌프의 교체수명으로 나눠 매해 발생하는 운영비용을 평준화시켰다. 여기서 펌프의 사용이 내구연한에 가까워질수록 증대되는 유지 · 보수비용등을 고려해야 하는데, 이 비용을 균등연간환산비용(Uniform Annual Series Amount)을 활용하여 산정하였다. 균등연간환산비용은 의사결정을 위해서 투자비용을 내용연수 기간 동안 동일한 수준으로 전환하는 것으로 초기비용을 연간비용화 한 뒤 여기에 순수연간비용을 더해 환산하는 공식대입법을 이용하였다.

$$APOC = APOD \times APPV \times \frac{\Phi}{\eta} \times \sum_{j=1}^{npump}\left(\sum_{i=1}^{t} EC_i H_{i,j} Q_{i,j}\right) \quad \text{Eq.(7)}$$

여기서,
$APOD$: 연간펌프운영일수 (Annual Pump Operating Days, d)
$APPV$: 펌프의 연간 순현재가치계수 (Annual Pumps Present Value coefficient)
Φ : 단위변환계수 (0.00278 kWh/m^4)
η : 펌프의 효율
$npump$: 총 펌프 수
EC_i : i 시간대의 전력요금(원/kWh)
$H_{i,j}$: i 시간대 펌프의 수두(m)
$Q_{i,j}$: i 시간대 펌프의 유량(m^3/h)

펌프설치비용은 kW 당 펌프설비비에 펌프용량을 곱해줌으로서 계산할 수 있다. kW당 펌프설비비를 산정하기 위해서는 일정용량의 설비에 대해 설계실적을 분석하고 배전반을 포함한 펌프비용과 특고압 수전설비비용, 옥외 변전설비비용, 배전선비용 등을 개략설계에 의해 적절히 산출한 후 이것을 계산용량으로 나누어 계산하였다.

$$PUCC = CPUMP\frac{\Phi}{\eta}\sum_{j=1}^{npump} \max(H_{1,j} \times Q_{1,j}, H_{2,j} \times Q_{2,j}, \cdots H_{24,j} \times Q_{24,j}) \quad \text{Eq.(8)}$$

여기서,
$CPUMP$: 단위전력 당 펌프건설비용(원/kW)
Φ : 단위변환계수 (0.00278 kWh/m4)

배수지 건설비용은 단위높이 당 건설비용과 배수지 높이의 함수로 산정하였다.

$$TCC = \sum_{i=1}^{ntank} UTC_i(d^i_{tank}) \times \max(h_{1,i}, \ldots, h_{T,i}) \quad \text{Eq.(9)}$$

여기서,
UTC_i : 저수조 i의 단위높이 당 저수조 건설비용 (원/m)
d^i_{tank} : 저수조 i의 직경(m)
$h_{T,i}$: 시간 T에서의 저수조 i의 수위(m)

3.3 제한조건의 설정

제한조건은 알고리즘을 통해 도출된 설계 솔루션이 유효한지 검토하기 위한 것으로, 설계인자들을 EPANET 2.0에 입력해 시뮬레이션을 한

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 4, pp. 413-428, August, 2013

뒤 출력되는 결과를 토대로 수압, 수량, 그리고 배수지운용능력 세 가지를 검토하였다. EPA-NET 2.0은 입력된 관망도 내의 수요가 있는 모든 절점에서의 수요를 만족한다는 것을 전제로 모의가 이루어지기 때문에, 만약 관망에서의 수리학적 흐름의 이상 진단은 절점에서의 수압을 통해 이루어지는 것이 일반적이다. 따라서 수요절점으로 표현된 수용가나 배수지로 표현된 탱크에서의 압력을 제한조건 범위 내로 운영되도록 설정하였다. 또한 실제 시스템에서는 정수장에서 생산 가능한 유량이 정해져 있으므로 수요절점에서의 수요량의 합이 공급절점에서의 공급 가능량 이내로 유지하기 위한 조건이 필요하다. 마지막 제한조건은 배수지의 운영에 관한 것으로, 24시간을 기준으로 모의를 하였을 때, 배수지의 수위가 처음상태로 돌아가도록 하기 위한 조건이다.

3.4 검증 관망

본 연구에서는 모델을 검증하기 위해 세 개의 검증 관망에 모델을 적용하였다. 검증을 위한 대상관망은 2-Looped network와 Hanoi network, 그리고 Ostfeld's Example network이다. 2-Looped network는 8개 관, 7개 절점과 1개 배수지로 이루어져 있는 예제 배수관망이다. 관 길이는 모두 1,000 m이며, Hazen-williams 조도계수는 130으로 설정하였다. 만족해야할 최소 제한수압은 30 m이다. Hanoi 배수관망은 Vietnam의 수도인 Hanoi시의 배수관망을 단순화시킨 검증관망으로 수두가 100 m인 저수지 하나에 네트워크로 공급되는 관이 하나인 것이 특징이다. 관망은 34개 관, 31개 절점으로 구성되어 있으며, 모든 절점의 표고는 0m이며 조도계수는 130이다. Ostfeld's Example network는 Ostfeld와 Tubaltzev(2008)가 ACO를 이용한 배수관망의 최소설계비용 모델을 검증하는 연구에서 가장 처음 제시한 검증관망으로서 관망의 구성요소로는 물이 공급되는 S1, S2, S3 총 3개의 소스노드가 있으며, S1과 S2는 펌프에 의해 가압을 받는다. 그리고 물의 소비가 있는 소비절점은 A ~ F로 총 6개이다. 관로는 총 11개로 관망을 구성하며, 가장 높은 표고에는 직경 36m의 탱크가 설치되어 있다. Fig. 2에 각각의 검증 관망을 나타내었으며, Table 2 ~ Table 8에 관망에 대한 상세정보와 설치비용을 나타내었다.

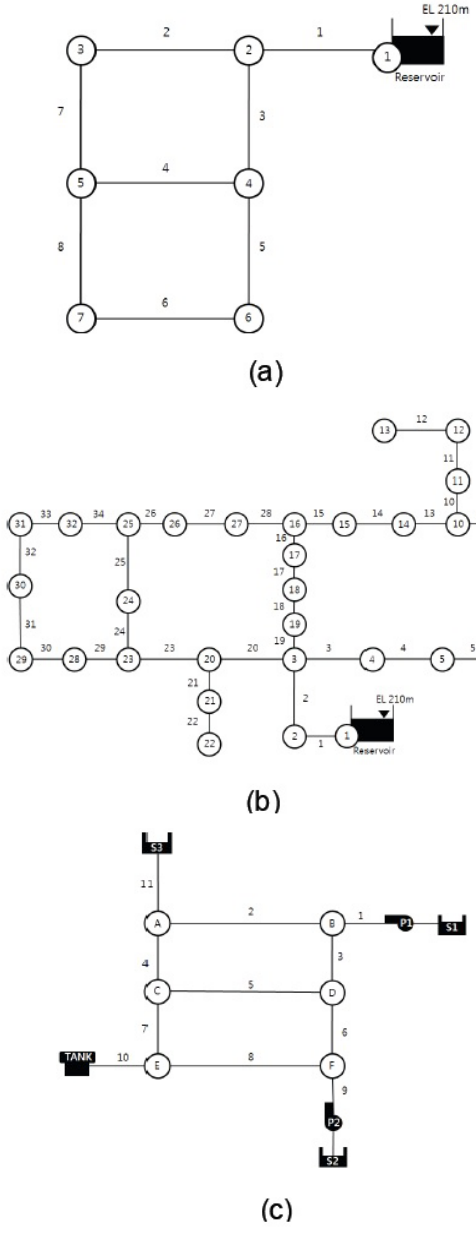


Fig. 2. Water distribution map : (a) 2-Looped network, (b) Hanoi water distribution network, (c) Ostfeld' s Example network

Table 2. Existing dimensions for 2-Looped network

Pipe	Pipe diameter (inch)	Pipe length (m)	Hazen-williams Roughness coefficient
1	18	1,000	130
2	10	1,000	130
3	16	1,000	130
4	2	1,000	130
5	14	1,000	130
6	10	1,000	130
7	10	1,000	130
8	1	1,000	130

Table 3. Cost data for the 2-Looped network

Diameter (inch)	Diameter (mm)	Cost ($/m)	Diameter (inch)	Diameter (mm)	Cost ($/m)
1	25.4	2	12	304.8	50
2	50.8	5	14	355.6	60
3	76.2	8	16	406.4	90
4	101.6	11	18	457.2	130
6	152.4	16	20	508	170
8	203.2	23	22	558.8	300
10	254	32	24	609.6	550

Table 4. Existing dimensions and cost for Hanoi water distribution network

Pipe	Pipe diameter (inch)	Pipe length(m)	Hazen-williams Roughness coefficient	Pipe	Pipe diameter (inch)	Pipe length(m)	Hazen-williams Roughness coefficient
1	40	100	130	18	40	800	130
2	40	1,350	130	19	40	400	130
3	30	900	130	20	40	2,200	130
4	30	1,150	130	21	20	1,500	130
5	24	1,450	130	22	12	500	130
6	24	450	130	23	30	2,650	130
7	20	850	130	24	24	1,230	130
8	12	850	130	25	20	1,300	130
9	12	800	130	26	12	850	130
10	30	950	130	27	20	300	130
11	30	1,200	130	28	24	750	130
12	24	3500	130	29	20	1,500	130
13	30	800	130	30	16	2,000	130
14	40	500	130	31	12	1,600	130
15	40	550	130	32	20	150	130
16	40	2,730	130	33	16	860	130
17	40	1,750	130	34	24	950	130

Table 5. Cost data for Hanoi water distribution network

Diameter (inch)	Diameter (mm)	Cost ($/m)	Diameter (inch)	Diameter (mm)	Cost ($/m)
12	304.8	45.73	24	609.6	129.33
16	406.4	70.40	30	762.0	180.75
20	508.0	98.39	40	1,016.0	278.28

Table 6. Node data for Ostfeld' s network

Node	Elevation(m)	Base demand(m^3/h)	Minimum pressure
A	120	100	30
B	150	100	30
C	150	270	30
D	155	120	30
E	160	200	30
F	165	330	30
S1	130	0	-
S2	120	0	-
S3	180	0	-
TANK	200	0	-

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 4, pp. 413-428, August, 2013

Table 7. Demand Pattern Coefficients and Energy Tariffs data for Ostfeld' s network

Time of day(hr)	Demand pattern coefficients	Energy tariffs ($/kWh)
00:00 ~ 06:00	0.2	0.020
06:00 ~ 12:00	0.8	0.064
12:00 ~ 18:00	1.2	0.120
18:00 ~ 24:00	0.6	0.048

Table 8. Unit Length Cost Data of Candidate Pipe Diameters data for Ostfeld' s network

Pipe diameter(mm)	Cost($/m)	Pipe diameter(mm)	Cost($/m)
25	2	305	50
51	5	356	60
76	8	406	90
102	11	457	130
152	16	508	170
203	23	559	300
254	32	610	550

3.5 연구대상 지역 관망

모델의 검증 후 K도의 S정수장에서 13개소의 배수지로 공급되는 상수도관망 시스템을 대상으로 설계 및 운영 최적화에 대한 모의를 하였다. S 정수장은 K도 S시에 위치하였으며 S시, Y시, H시 등으로 용수를 공급하는 광역상수도 계통으로 2개로 나눠진 송수관이 각 지역의 배수지로 연결되어있다. 관로의 총 연장은 132.37 km이며 관경은 소구경인 300 mm부터 1,800 mm의 대구경까지 다양하게 매설되어있다. Fig. 3는 대상지역의 관망 모식도를 나타내었으며, Table 9 ~ Table 11에 관망에 대한 상세정보를 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 알고리즘 파라미터 설정과 민감도 분석

각각의 알고리즘 파라미터들은 독립적 또는 복합적으로 모델에 영향을 미치기 때문에 각 파라미터들의 솔루션에 대한 민감도를 파악하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 해 탐색을 위한 초기 개미의 수, 우수그룹 내 개미의 수, 페로몬 증발률, 총 세 가지의 파라미터들에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 민감도분석은 검증관망인 Hanoi network 기준으로 수행하였으며, Fig. 4 ~ Fig. 6에 나타내었다. 각각의 최적값에 대하여 가장 우수한 최적값과 평균 및 표준편차를 고려하여 초기 개미의 수는 3,600, 우수그룹 내 개미의 수는 20, 페로몬 증발률은 1을 적용하였을 때 다른 옵션들보다 결과가 우수하였다. 이는 바꿔 말하면 페로몬 증발률을 적용하지 않았을 때 가장 좋은 최적값을 도출한 것이다. 민감도 분석의 최종 결과를 반영하여 본 연구에서 개발된 모델에 사용된 알고리즘 파라미터들은 Table 12와 같다.

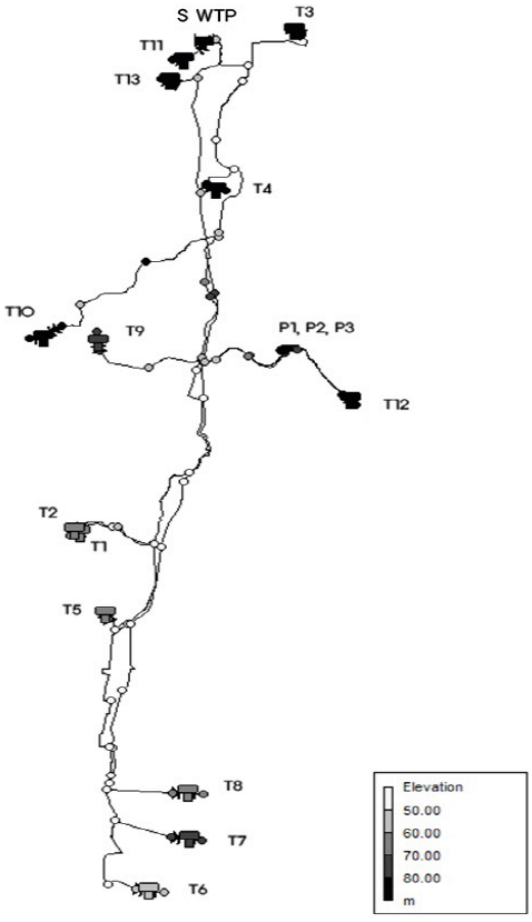


Fig. 3. Map of the water distribution system from S WTP

Table 9. Information of Pipes for study network

Pipe	Length(m)	Dia.(㎜)	C	Pipe	Length(m)	Dia.(㎜)	C	Pipe	Length(m)	Dia.(㎜)	C
P1	1,562.17	300	125	P24	48.77	800	105	P47	651.5	1100	130
P2	14.56	300	120	P25	138.32	800	90	P48	3,479.88	1100	80
P3	132.66	350	105	P26	1,629.14	800	115	P49	2,422.41	1200	115
P4	3,569.98	350	115	P27	3,200	800	90	P50	3,255.75	1350	100
P5	2,536.09	400	105	P28	1,901.59	800	90	P51	4,140.02	1350	105
P6	277.65	400	90	P29	2,441.02	800	100	P52	2,979.5	1350	105
P7	650.67	500	90	P30	3,343.54	900	80	P53	1,427.3	1350	105
P8	598.64	500	115	P31	3,639	900	125	P54	2,979.5	1350	105
P9	2,965	500	80	P32	1,529.69	900	80	P55	164.64	1500	105
P10	198	500	90	P33	3,993.83	900	115	P56	926.37	1500	105
P11	519.43	500	90	P34	3,753	900	115	P57	3,026.04	1500	105
P12	270.38	600	90	P35	4,348.63	900	125	P58	1,794.39	1500	130
P13	2,145.78	600	105	P36	1,316.26	900	80	P59	3,679.58	1500	130
P14	293.92	600	80	P37	3,639	900	125	P60	100	1500	130
P15	277.65	600	90	P38	2,370.65	1000	105	P61	3,026.04	1500	105
P16	1,616.31	600	125	P39	1,604.6	1000	120	P62	3,137.17	1650	85
P17	1,642.92	600	100	P40	2,633.12	1000	110	P63	612.28	1650	130
P18	471.18	600	115	P41	405.76	1000	85	P64	852.77	1650	130
P19	374.92	600	80	P42	286.97	1000	80	P65	2,387.22	1650	130
P20	3,090	700	90	P43	100	1000	100	P66	3,079.33	1800	130
P21	1,804.5	700	105	P44	3,565.54	1100	130	P67	4,046.76	1800	130
P22	145.52	700	90	P45	885.33	1100	90	P68	3,545.62	1800	130
P23	24.47	700	130	P46	3,418.72	1100	130	P69	5,277.82	1800	130

Table 10. Information of junctions for study network

Junction	Elevation(m)	Junction	Elevation(m)	Junction	Elevation(m)	Junction	Elevation(m)
J1	9.86	J21	44.47	J41	60.1	J61	79.3
J2	10.33	J22	46.51	J42	62	J62	80
J3	11.2	J23	48.1	J43	62	J63	80
J4	11.56	J24	49.35	J44	64.88	J64	80.37
J5	12.7	J25	49.56	J45	64.88	J65	80.37
J6	13.7	J26	50.44	J46	65	J66	80.37
J7	14.5	J27	50.7	J47	65	J67	80.37
J8	16	J28	51.7	J48	66.9	J68	81.8
J9	17.29	J29	51.7	J49	68	J69	91.8
J10	21.8	J30	51.85	J50	68	J70	91.8
J11	23.24	J31	52	J51	70.33	J71	96
J12	24.45	J32	52.12	J52	72	J72	96
J13	25.65	J33	52.4	J53	72	J73	100
J14	26.27	J34	52.6	J54	72.4	J74	100
J15	26.3	J35	52.81	J55	74.9	J75	107.5
J16	30.8	J36	53.86	J56	74.9	J76	147
J17	33.85	J37	55.1	J57	75.4	J77	147
J18	37.2	J38	56.9	J58	77.41	J78	158
J19	40.25	J39	57.6	J59	77.53		
J20	41.9	J40	60.1	J60	78.4		

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 4, pp. 413-428, August, 2013

Table 11. Information of pumps for study network

Pump ID	Q(m³/d)	H(m)
P1	5947.2	97
P2	5342.4	97
P3	6105.6	97.45

Table 12. Algorithm parameters for developed model used in this study

Initial ant number	Ant number in best group	Pheromone decrease rate	iteration	Initial ant number decrease rate	Penalty cost
3600	20	1	3000	0.1	5*109

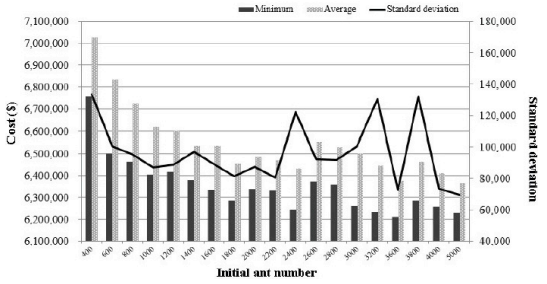


Fig. 4. Result of sensitivity analysis for initial ant number

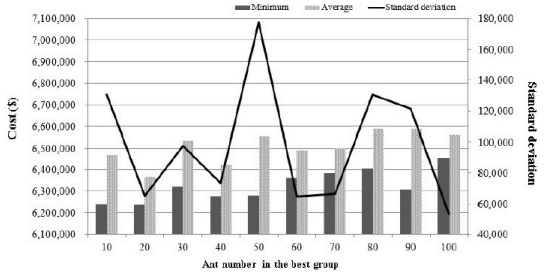


Fig. 5. Result of sensitivity analysis for ant number in the best group

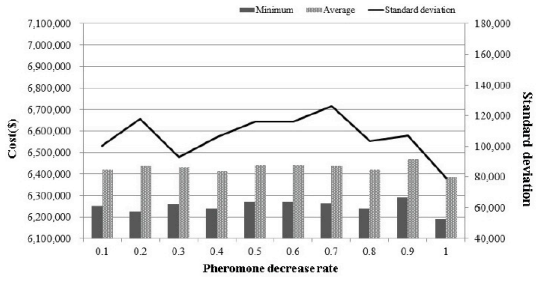


Fig. 6. Result of sensitivity analysis for pheromone decrease rate

4.2 모델의 검증

본 연구에서 개발한 상수도 관망 시스템 설계 운영 최적화 모델이 정확하고 타당성 있는 설계를 하는지 검증하기 위해 기존 연구에서 이용된 검증 관망을 이용하여 모든 환경조건(최소 제한수압, 관경, 관 길이, 관 공사비용 등)을 기존 연구와 동일하게 적용하였으며, 모델을 통해 설계된 결과를 다른 알고리즘에 대한 연구와 비교함으로써 모델의 적정성을 검증하였다. 사용된 검증관망은 자연유하식과 가압식으로 구분하여 평가하였다.

자연유하식은 2-Looped network와 Hanoi network를 이용하였으며, 2-Looped network는 비교적 문제의 크기가 작은 관망으로 Alperovits과 Shamir(1977)의 연구에서 처음 적용된 이후 Morgan과 Goulter(1986), Savic와 Walters(1997), Cunha와 Sousa(1999), Van Dijk 등(2008)에 의해 모델을 비교하는데 사용되어 왔으며, Hanoi network의 경우 Savic과 Walters(1997), Tospornsampan 등(2007), Van Dijk 등(2008) 이 모델 검증을 위해 적용하였다.

가압식 관망의 검증을 위해서 Ostfeld's example network를 이용하였다. Ostfeld 와 Tubaltzev(2008)는 가압식 관망을 대상으로 배수지의 최적설계 운영조건에 처음으로 개미군집 최적화 알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서 개발한 모델의 기초가 되는 Ostfeld 등(2008)의 최적화 결과를 본 모델을 통한 최적화 결과를 비교해 봄으로써 선행연구를 기반으로 한 개선된 알고리즘이 기존 알고리즘에 비해 실제 성능이 개선되었는지를 비교하였다.

4.2.1 2-Looped network

2-Looped network는 예제 관망으로써 Alperovits와 Shamir(1977)의 연구에서 처음 적용된 이후 여러 연구에 적용되었다. 2-Looped network는 비교적 문제의 크기가 작은 관망으로 대부분의 선행 연구에서 최적 설계비용인 $419,000을 도출하였다(Table 13). 본 연구에

서 개발한 모델역시 이전의 선행연구에서 찾아낸 최적 설계인자들과 설계비용을 찾아내는데 성공하였다.

4.2.2 Hanoi network

Hanoi 배수관망은 Savic과 Walters(1997), Tospornsampan 등(2007), Van Dijk 등(2008) 등에 의해 적용된 검증관망이다. 개발된 모델에서의 최저비용은 1,708 번째 반복에서 $6,164,384를 도출하였다.

비교대상이 된 알고리즘으로는 HS(Harmony Search), GA(Genetic Algorithm), SCE(Shuffled Complex Evolution), SABSA(Self Adaptive Boundary Search Algorithm), SA(Simulated Annealing), Genetic Algorithm-weighted penalty 총 6개 이며, 비교 결과를 **Fig. 7**에 나타내었다.

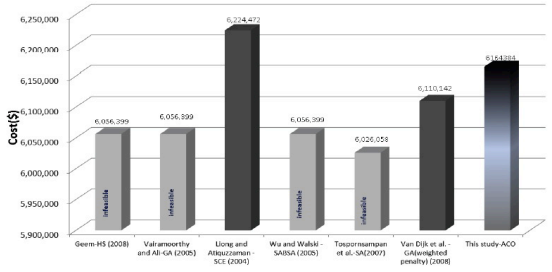


Fig. 7. Comparison with the results of previous study for Hanoi network

최저비용 비교결과 Geem(2008), Wu와 Walski(2005), Tospornsampan 등(2007)에서 도출된 최저비용솔루션은 제한조건인 최소수압 30 m를 만족하지 못한 솔루션이었으며 따라서 본 연구에서 개발한 모델의 최적값과 제한조건을 만족한 Liong과 Atiquzzaman(2004)와 Van Dijk 등(2008)의 연구 결과와 비교 해 본 결과, Liong과 Atiquzzaman 등(2004)의 결과값 보다는 $60,088가 저렴하였고, Van Dijk 등(2008)의 결과 보다는 $54,242가 높은 비용을 산출한 것으로 나타났다.

결과적으로 도출된 최저비용을 비교대상으로 본 연구를 통해 개발된 모델을 선행 연구된 다른 알고리즘을 이용한 모델과 비교해 본 결과 최적값의 비용적 측면과 제한조건을 만족하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과를 통해 본 연구에서 개발된 모델의 타당성이 검증되었다고 판단된다. 또한 기존의 자연유하식 상수도관망만을 고려한 모델보다 가압식 관망의 조건이 고려됨으로써 기존 연구에서 제안된 알고리즘보다 향상된 모델이라고 판단된다.

4.2.3 Ostfeld' s Example network

Ostfeld와 Tubaltzev(2008)는 가압식 관망을 대상으로 배수지의 최적설계 운영조건에 처음으로 개미군집최적화 알고리즘을 사용하였다.

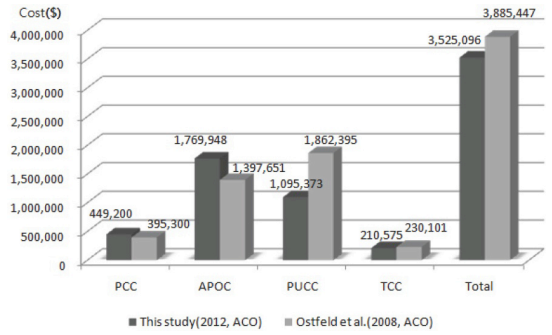
Table 13. Comparison with the results of previous study for 2-Looped network (inch)

Pipe	Savic and Walters (1997,GA)	Cunha and Sousa (1999,SA)	Lliong and Atiquzzaman (2005, SCE)	Van Dijk et al. (2008,GA)	This Study
1	20	18	18	18	18
2	10	10	10	10	10
3	16	16	16	16	16
4	1	4	4	4	4
5	14	16	16	16	16
6	10	10	10	10	10
7	10	10	10	10	10
8	1	1	1	1	1
Cost($)	420,000	419,000	419,000	419,000	419,000

GA: Genetic Algorithm, SA: Simulated Annealing
SCE: Shuffled Complex Evolution

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 4, pp. 413-428, August, 2013

본 연구를 통해 수정된 모델과의 비교를 Fig. 8에 나타내었다. 본 연구의 모델 최적화 결과는 비교적 빠른 54번째 반복횟수에서 최적값인 $3,525,096을 도출하였다. 각 비용 산출 종류별 결과를 선행연구의 결과, 관 설치비용(PCC)은 $449,200로 선행연구보다 $53,900 높았으며, 연간펌프운영비용(APOC)도 선행연구의 결과보다 $372,297 높은 $1769,948로 나타났다. 하지만 탱크건설비용(TCC)은 $19,526 적은 $210,575로 도출되었고, 가장 많은 차이를 보인 펌프건설비용(PUCC)은 비용이 $767,022 감소하여 $1,095,373으로 나타났다. 전체 설계 및 운영비용이 선행연구의 결과보다 $720,703 감소하여 총 비용절감액은 18.5 %로 나타났다.



* PCC: Pipe Construction Cost, APOC: Annual Pump Operation Cost
PUCC: Pump Construction Cost, TCC: Tank Construction Cost

Fig. 8. Comparison between the results of Ostfeld' s et al.(2008) and this study in Ostfeld' s example network

4.3 연구대상지역에 대한 모델의 적용성 평가

4.3.1 최저비용 설계 · 운영 시나리오 분석

연구 대상지역으로 K도의 S정수장에서 공급되는 송수계통의 송수관과 배수지, 그리고 가압펌프장을 선정하였으며, 적용한 결과를 물 사용량을 고려하여 기존 관망과 비교하여 본 모델의 현장 적용성을 평가하였으며, 그 결과를 Table 14에 나타내었다.

개발된 모델의 적용결과 관 설치비용, 연간펌프운영비와 설치비용, 그리고 배수지 건설비용을 모두 합친 전체 설계 및 운영비용은 1,663 회의 반복 횟수에서 약 660억 원으로 도출되었다. 전체 비용에서 가장 많은 부분을 차지한 관 설치비용은 기존 설치비용인 642억 원에서 약 7.8 %인 50억 원을 절감시킨 약 592억 원을 도출하였으며, 절감율이 가장 높았던 부분은 연간 펌프운영비용으로, 최적화 후 기존 비용인 66억 원에서 약 21 %인 14억 원을 절감한 52억 원을 도출하였다. 이러한 이유는 본 연구에서 추가적인 분석을 수행하지 않았으나 관 설치비용이나 다른 비용들은 기존에 설계된 스펙에서 크게 변하지 않았으며, 현재 가동중인 펌프 스케줄링이 개발된 모델에 의해 제시된 스케줄링과 큰 차이를 보여 나타난 결과로 판단된다. 펌프건설비용의 경우 기존의 비용보다 높게 도출되어 11.8억 원에서 12.8억 원으로 나타났다. 마지막으로 배수지 설치비용은 절감율이 8.72 %로 약 3.66억 원에서 약 3.34억 원으로 절감되어, 전체적인 비용은 약 8.8 %의 비용절감의 효과를 볼 수 있었다.

Table 14. Comparison design and operating cost between existing network and optimal network

Cost	Design and operating cost(won)		Savings	
	Existing network	Optimal network	Cost(won)	Percentage(%)
PCC	64,217,406,545	59,183,342,705	5,034,063,840	7.8
APOC	6,669,062,723	5,230,854,095	1,438,208,628	21.6
PUCC	1,177,275,329	1,276,693,637	-99,418,308	-8.4
TCC	343022331.2	334273837.6	6,381,602,653	8.8
Total	72,406,766,928	66,032,285,142	6,374,481,786	8.8

* PCC: Pipe Construction Cost, APOC: Annual Pump Operation Cost
PUCC: Pump Construction Cost, TCC: Tank Construction Cost

Table 15. Information of aged pipe in study network

Pipe ID	Diameter(mm)		Cost(won)	
	Existing network	Optimal network	Existing network	Optimal network
P30	900	500	1,035,507,712	590,422,354
P32	900	900	473,751,112	473,751,112
P36	900	800	407,650,987	358,703,226
P41	1000	800	157,308,689	110,576,498
P42	1000	800	111,255,112	78,204,203
P45	1100	1100	385,275,253	385,275,253
P48	1100	1000	1,514,363,739	1,349,111,197
P62	1650	1650	2,663,887,122	2,663,887,122
Total			6,748,999,726	6,009,930,967

4.3.2 우선교체대상 관로의 경제성평가

매설된 상수도관은 매설 경과년수가 증가함에 따라 부식 및 스케일 등 이 발생하고 이렇게 관의 노후가 진행되면서 손실수두 또는 누수를 유발한다. 따라서 노후된 관을 적시에 교체하는 것은 매우 중요한 일이며, 본 연구에서는 교체 우선순위에 있는 관을 대상으로 교체해야할 최적관경을 Table 15와 같이 제안하고자 한다. 대상 연구지역 관망에서 매설 경과년수가 20년 이상인 불량관은 총 8개 관로로 조사되었으며 이들만을 대상으로 하여 본 모델을 적용한 결과, 8개 관로 중 5개의 관경에 변화가 있었으며, 기존에 매설된 관경보다 모두 적은 관경이 선택되었다. 불량관의 교체관경을 최적화 한 결과 관 설치비용의 약 11 %인 7.39억 원의 공사비용을 절감 할 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 상수도관망 시스템의 최적설계 모델의 현장 적용성을 검증하기 위해 기존에 개발된 모델을 보완하고, 모델의 적정성을 검증하기 위해 기존 연구와 비교하고 수정된 모델을 현장에 적용하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 개미군집최적화 알고리즘을 적용함에 있어 기존에 연구된 ASrank를 기반으로 우수한 해에 대하여 평가하고 차등적으로 확률을 업데이트하는 방식에서 중복되는 해는 한 개만 남기는 메카니즘을 추가하여 지역적 최적점에 빠질 가능성을 최소화 하여 더 광범위한 탐색공간을 확보할 수 있었으며, 기존 모델과의 비교에서 대등하거좀 더 낮은 최적값을 얻을 수 있었다.

(2) 기존 연구에서 검증을 위해 사용되었던 자연유하식 예제관망인 2-Looped network, Hanoi network와 가압식 예제관망인 Ostfeld's example network와의 비교에서 2-Looped network와 Hanoi network에서는 선행연구와 동일하거나 동등한 수준의 최적해를 얻을 수 있었다. 또한 Ostfeld's example network에서는 기존의 최적해보다 약 18.5 % 더 저렴한 최적해를 도출하여 모델의 성능 및 유효성이 검증되었다.

(3) 개발된 모델로 S 정수장에서 15개의 배수지로 용수를 공급하는 상수도관망 시스템을 대상으로 최적 설계 및 운영을 제안하였다. 전체 상수도관망 시스템을 구성하는 관로의 관경과 펌프규격 및 스케줄, 그리고 배수지에 대하여 최적화 한 결과 기존 설치비용인 642억 원에서 약 7.8 %인 50억 원을 절감시킨 약 592억 원을 도출하였으며, 현실적인 모델의 적용성을 위

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 4, pp. 413-428, August, 2013

하여 우선교체대상인 불량관 만을 대상으로 한 최적화 모의 결과, 기 설치된 관의 관경의 일부를 축소시켜 기존의 공사비용의 약 11 %인 7.39억 원을 절감한 것으로 나타나 개발된 모델의 효용성을 확인할 수 있었다.

지금까지 실무에서 최적해를 얻을 때 까지 반복해 계산하였던 관망의 수리해석을 개미군집 최적화 알고리즘과 수리해석 모델인 EPANET 2.0을 연계한 모델로 개발하여, 빠르고 정확한 상수도관망 시스템의 다양한 설계인자를 포함하여 재현을 가능하게 하였다. 본 연구에서는 개발한 모델을 통해 수량, 수압, 수질을 모두 만족하는 상수도관망 시스템을 경제적으로 설계함으로써, 상수도관망 시스템을 신설 및 확장 뿐 아니라 노후된 시설의 교체도 경제적으로 적절한 규모의 공사가 될 수 있도록 도움을 줄 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업(GT-11-G-02-001-1)”으로 지원받은 과제입니다.

참고문헌

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

Bullnheimer, B., Hartl, R. F. and Strauss, C. (1997) A new rank based version of the Ant System: A computational study, Central european journal for operations research and economics, 7(1), pp. 25 - 38.

Cembrowicz, R. G. (1992) Water supply systems optimization for developing countries, Pipeline systems. Springer Netherlands, pp. 59-76.

Cunha, M. and Sousa, J. (1999) Water distribution network design optimization: simulated annealing approach, Journal of water resources planning and management, 125(4), pp. 215-221.

Dandy, G. C., Simpson, A. R. and Murphy, L. J. (1996) An improved genetic algorithm for pipe network optimization, Water resources research, 32(2), pp. 449-458.

Eusuff, M. M. and Lansey, K. E. (2003) Optimization of water distribution network design using shuffled frog leaping algorithm, Journal of water resources planning and management, 129(3), pp. 210-225.

Geem, Z. W. (2006) Optimal cost design of water distribution networks using harmony search, Engineering optimization, 38(3), pp. 259-277.

Gupta, I., Gupta, A. and Khanna, P. (1999) Genetic algorithm for optimization of water distribution systems, Engineering modelling & software, 14, pp. 437-446.

Hong, M. D., Yu, Y. H. and Jo, G. S. (2010) An ant colony optimization heuristic to solve the VRP with time window, Journal of korea information processing systems, 17-B(5), pp. 389-398

Ko, S. K., Oh, M. H. and Ahn, D. S. (1992) Application of a multiobjective technique for the optimum operation of pumps and reservoirs in service water transmission systems, Journal of korean society of water and wastewater, 1, pp. 8-18

Liong, S. Y. and Atiquzzaman, M. (2004) Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution, Journal of the institution of engineers, Singapore, 44(1), pp. 93-107.

Loganathan, G. V., greene, J. J. and Ahn, T. J. (1995) Deisign heuristic for global minimum cost water-distribution systems, Journal of water resources planning and management, 121(2), pp. 182-192.

Maier, H. R., Simpson, A. R., Zecchin, A. C., Foong, W. K., Phang, K. Y., Seah, H. Y. and Tan, C. L. (2003) Ant colony optimization for design of water distribution systems, Journal of Water resources planning and management, 129(3), pp. 200-209

Morely, M. S., Atkinson, R. M., Savić, D. a. and Walters, G. A. (2001) GAnet: genetic algo-

rithm platform for pipe network optimisation, Advances in engineering software, 32(6), pp. 467-475.

Morgan, D. R. and Goulter, I. C. (1985) Optimal urban water distribution design, Water resources research, 21(5), pp. 642-652.

Ostfeld, A. and Tubaltzev, A. (2008) Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems, Journal of water resources planning and management, 134(2), pp. 107-118

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

Savic, D. A. and Walters, G. A. (1997) Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks, Journal of water resources planning and management, 123(2), pp. 67-77.

Schaake, J. C., Lai, D. and Lai, F. H. (1969) Linear programming and dynamic programming application to water distribution network design, Rep. No. 116, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass

Simpson, A. r., dandy, G. C. and Murphy, L. J. (1994) Genetic algorithm compared to other techniques for pipe optimization, Journal of water resources planning and management, 120(4), pp. 423-443.

Tospornsampan, J., Kita, I., Ishii, M. and Kitamura, Y. (2007) Split-pipe design of water distribution network using simulated annealing, World Academy of Science, Engineering and Technology, 4, pp. 382-392.

Vairamoorthy, K. and Ali, M. (2005) Pipe index vector : A method to improve genetic-algorithm-based pipe optimization, Journal of hydraulic engineering, 131(12) pp. 1117-1125.

Van Dijk, M., Van Vuuren, S. J. and Van Zyl, J. E. (2008) Optimizing water distribution systems using a weighted penalty in a genetic algorithm, Water SA, 34(5), pp. 537-548.

Vasan A. and Simonovic, S. P. (2010) Optimization of water distribution network design using differential evolution, Journal of water resources planning and management, 136(2), pp. 279-287.

Wu, Z. Y. and Walski, T. (2005) Self-adaptive penalty approach compared with other constraint-handling techniques for pipeline optimization, Journal of water resources planning and management, 131(3), 181-192.