



Development of multi-objective optimal design approach for water distribution systems based on water quality-hydraulic constraints according to network characteristic

Ko, Mun Jin^a · Choi, Young Hwan^{b*}

^aMaster Student, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

^bAssistant Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

Paper number: 21-117

Received: 30 November 2021; Revised: 15 December 2021; Accepted: 20 December 2021

Abstract

Water distribution systems (WDSs) are a representative infrastructure injecting chlorine to disinfect the pathogenic microorganisms and supplying water from sources to consumers. Also, WDSs prescribe to maintain the usual standard (0.1-4.0 mg/L) of residual chlorine. However, the user's usage pattern, water age, network shape, and type affect the hydraulic features (i.e. nodal pressure, pipe velocity) and water quality features (i.e., the residual chlorine concentration). Therefore, this study developed an optimization approach for optimizing WDSs considering water quality-hydraulic factors using Multi-objective Harmony Search (MOHS). The design cost and the system resilience were applied as the design objective functions, and the nodal pressure and the concentration of residual chlorine are used as constraints. The derived optimal designs through this approach were analyzed according to network characteristics such as the network shapes and type. These optimal designs can meet the safety of economic and water quality aspects to increase user acceptance.

Keywords: Optimal design of water distribution systems, Multi-objective optimization, Network shapes and type, Residual chlorine, System resilience, Multi-objective Harmony Search (MOHS)

네트워크 특징에 따른 수질-수리 제약조건 기반 상수도관망 다목적 최적 설계 기술개발

고문진^a · 최영환^{b*}

^a경상국립대학교 토목공학과 석사과정, ^b경상국립대학교 토목공학과 조교수

요지

상수도관망은 대표적인 사회기반시설로 수원에서 수용가에게 물을 공급하는 과정에서 병원성 미생물을 소독하기 위해 염소를 주입한다. 안전한 물의 공급을 위해 잔류염소 농도 기준(0.1-4.0 mg/L)을 유지하도록 규정하고 있으나, 사용자의 사용 패턴, 수령, 상수도관망의 형식 및 특징은 수리학적(i.e., 절점의 압력, 관로의 유속) 및 수질적(i.e., 잔류염소 농도) 특징에 영향을 미친다. 따라서, 본 연구에서는 Multi-objective Harmony Search (MOHS)를 사용하여 수질-수리 인자를 고려한 상수도관망 최적 설계 기법을 개발하였다. 설계인자로는 설계비용과 시스템 탄력성을 고려하였으며, 절점의 압력과 잔류염소 농도를 제약조건으로 적용하였다. 도출된 최적설계안은 상수도관망의 형식 및 특징에 따라 분석하였다. 이러한 최적설계안은 경제적인 측면과 수질 측면의 안전성을 충족할 수 있으며, 사용자의 사용성을 증가시킬 수 있다.

핵심용어: 상수도관망 최적 설계, 다목적 최적화, 네트워크 형식 및 특징, 잔류염소 농도, 시스템 탄력성, Multi-objective Harmony search (MOHS)

*Corresponding Author. Tel: +82-55-772-3292
E-mail: yh.choi@gnu.ac.kr (Y. H. Choi)

1. 서론

상수도관망은 수원에서 용수를 안정적인 수량, 안전한 수질, 적절한 수압을 만족하는 범위에서 수용가에 공급하는 것을 목표로 하고 있다. 하지만 최근 상수도에 대한 수리적, 수질적 비정상상황(i.e., 관파단, 누수, 적수)의 발생으로 많은 사회적 문제를 야기한다. 이러한 비정상상황은 관로 파괴 또는 갑작스러운 수요량 증가 등의 원인으로 수용가의 적정 수압(상수도 설계기준 최소압력인 150 kPa)을 만족하지 못하는 문제가 야기되며, 수계전환 및 관로의 유지관리 부실로 인한 적수 발생, 배수지의 유출 발생 및 잔류염소 농도의 기준치 미달 등의 수질적 문제를 발생시킨다. 특히, 수질 측면에서 잔류염소 투입은 수원에서 수용가까지 물을 공급하는 과정 중 장티푸스와 같은 병원성 미생물에 의해 발생하는 수질오염을 방지하기 위하여 주입하지만 과다하게 주입할 경우 소독부산물에 의한 위험이 존재하기 때문에 염소 주입량에 대한 기준을 만족해야 한다.

국제보건기구(WHO)에서 효과적인 먹는 물의 소독을 위해 최소 잔류염소 농도를 0.2 mg/L, 최대 잔류염소 농도를 5 mg/L을 권고하고 있으며, 국내에서는 잔류염소 농도를 0.1 mg/L~4.0 mg/L의 기준을 만족하도록 법제화되어 있다(Cotruvo 2017; 수도법 시행규칙 제22조의 3). 하지만 비정상상황으로 인해 급격한 유량 및 수압 변동으로 체류 시간이 길어질 때 잔류염소 농도 기준을 충족하지 못하는 경우가 존재한다. 따라서, 효과적인 상수도관망 설계를 위해서는 수질-수리적인 특징을 동시에 고려하여 상수도관망 최적설계안을 도출할 수 있는 기법이 필요한 실정이다. 이러한 이유로 상수도관망 설계 분야에서 1970년부터 비선형 계획법 또는 최적화 알고리즘을 이용한 최적 설계가 수행되었다(Gupta *et al.*, 1972; Shamir, 1974; Alperovits and Shamir, 1977; Quindry *et al.*, 1981; Yates *et al.*, 1984).

초기의 상수도관망 최적 설계는 시공비용 최소화만을 고려하여 최종적인 설계비용을 줄이는 것을 목적으로 연구가 수행되었다(Kim *et al.*, 1994; Dandy *et al.*, 1996; Savic and Walters, 1997; Shin and Park, 1998; Eusuff and Leansey, 2003; Geem, 2006). 하지만 이러한 설계는 미래의 불확실한 상황에 대한 대처가 취약하고, 비정상상황에서도 안전한 물을 공급할 수 있는 공급성능 등 사용자의 다양한 요구를 충족시키지 못하였다. 따라서 관로의 설계비용과 신뢰도, 탄력성, 강건성 등의 설계 인자를 동시에 고려하여 설계함으로써 상수도관망의 비용 측면과 급수 안정성을 확보할 수 있었다(Ostfeld, 2004; Choi *et al.*, 2015; Jung *et al.*, 2014; Hwang, 2018). 또한,

상수도관망의 펌프, 탱크 등을 설계변수로 고려하여 시스템의 설계 및 운영비용과 신뢰성을 다목적 최적화 기법을 사용하여 최적설계안을 도출하는 연구(Jung *et al.*, 2010, 2014, 2016; Choi and Kim, 2019)와 최적화 알고리즘의 특징을 고려하여 최적설계안을 비교 분석하는 연구가 진행되어왔다(Choi *et al.*, 2015; Hong *et al.*, 2016; Yazdi *et al.*, 2017).

나아가 기존 상수도관망 설계를 진행할 시에는 계획 1일 최대급수량을 고려하여 고정시간 모의만으로 설계를 진행하였지만, 수용가의 수요량 변화를 고려하여 절점의 압력, 잔류염소 농도 등 시간에 따른 해석결과를 분석하기 위해 기간확장 모의(Extended Period Simulation, EPS)를 활용한 설계를 수행하여 수용가에 수리-수질 측면 안전한 물을 공급하기 위한 연구가 진행되고 있다(Kang and Lansey, 2009; Siew and Tanyimh, 2010; Siew *et al.*, 2016). 특히, 관망의 형식과 특징은 절점의 압력과 같은 수리학적 요인뿐만 아니라 염소농도 변화 폭에도 영향을 주기 때문에 상수도관망 최적 설계를 수행함에 있어 고려해야 한다. 하지만 기존 연구에서는 특정 형태의 benchmark 상수도관망 문제를 고려하거나 가상의 상수도관망을 활용하여 기법을 검증하는 등의 적용사례가 있다.

이 밖에 상수도관망 운영 측면에서는 수질 측면의 안전성을 향상하기 위하여 각 수용가의 위생 안전성을 위해 각 수용가의 잔류염소 농도 균등화, 재염소 최적 주입지점, 재염소 최적 주입량, 수질 측면을 고려한 연구(Kim *et al.*, 2017; 2020; Lansey *et al.*, 2007; Shokoohi *et al.*, 2017; Yoo *et al.*, 2018; Seo *et al.*, 2019)가 진행되고 있으며, 비정상상황과 수용가의 물의 수요 변동성을 고려한 실제 운영상황을 고려하여 수리-수질 측면 최적화 연구가 진행되었다(Lee *et al.*, 2019). 이러한 연구들은 수용가에서의 잔류염소 농도를 설계단계에서 고려할 시에는 관망의 크기가 유사해도 관망의 형식 및 특징에 따라 잔류염소 농도의 큰 영향을 미치는 용수의 체류 시간, 유속이 달라지므로 관망의 특징을 고려한 설계가 필요하다.

초기에 상수도관망의 형식(i.e., 수지상식, 혼합식, 격자식)을 관망도 검토를 통해 분류하였지만(Cembrowicz, 1992; NAP, 2007), 이러한 분류는 수지상식 관망 또는 격자식 관망과 같은 형식의 특징이 분명한 관망 분류에는 효과적이다. 그러나, 복합적인 형식의 특징을 가지고 있는 관망을 분류하기 위해서는 추가적인 분류 기준이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 주요 관망의 평균 크기로 관망의 특징(송배수관)을 구분하고, 상수도관망을 골격화(skeletonization) 후 관망의 형식을 정량화하여 분류하는 평가방법을 제안하였다(Hwang and Lansey, 2017). 또한, 이러한 상수도관망의 형식 및 특징을 기반으로 하여 최적 설계(Jung *et al.*, 2019; Mu *et*

al., 2021)를 수행하였지만, 대부분의 연구에서는 수리학적 특징만으로 설계 제한조건으로 고려하였기 때문에 수질적 문제를 예방하기에는 한계가 있다.

상수도관망의 수질 모의는 온도에 따른 Bulk Coefficient, Wall Coefficient 등의 매개변수에 큰 영향을 받기 때문에 관의 재질, 관의 직경, 계절적 특징을 고려하여 실험적 방법을 통한 매개변수 결정연구(Rossmann *et al.*, 1994; Choi and Wang, 1997; Chung *et al.*, 2006; Kowalska *et al.*, 2006; Ahn *et al.*, 2007; Noh and Park, 2017)가 수행되었다. 그러나 선행연구들은 운영단계에서 잔류염소 농도를 고려하여 운영 최적화를 수행하였지만, 설계과정에서의 각 수용가의 잔류염소 농도와 관망의 형식 및 특징, 비정상상황 등의 설계 인자를 동시에 고려한 상수도관망 최적 설계가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 비정상상태에서도 정상상태와 유사한 시스템 운영이 가능하도록 시스템의 탄력성 최대화와 설계비용 최소화를 설계 인자로 설정하고, 절점의 압력 조건과 잔류염소 농도를 제약조건으로 고려하여 Multi-objective Harmony Search를 이용한 최적설계안을 관망의 형식, 특징에 따라 비교 분석하였다.

2. 방법론

본 연구에서는 설계단계에서 잔류염소 농도를 고려한 최적 설계 및 상수도관망의 잔류염소 농도의 시간적 변화를 모의하기 위하여 EPANET의 기간확장 모의를 활용하였다. 수리 측면의 상수도관망이 요구하는 최소압력과 수질 측면의 각 수용가의 잔류염소 농도를 제약조건으로 고려함과 동시에 상수도관망 시스템의 탄력성 최대화와 설계비용 최소화를 설계 인자로 다목적 최적 설계를 진행하였으며, 각 차이점 분석을 위해 압력만을 제약조건으로 한 설계안과 압력과 잔류염소 농도를 제약조건으로 한 설계안을 비교 분석하였다.

2.1 다목적 최적화 기법

본 연구에서 수질-수리 인자를 고려한 상수도관망 다목적 최적 설계를 위해 사용한 최적화 알고리즘은 Multi-objective Harmony Search (MOHS) (Choi *et al.*, 2017) 이다. MOHS는 기존 음악이라는 최적의 화음을 위해 여러 악기가 즉흥적으로 연주되는 소리가 연습을 반복할수록 더 좋은 화음을 만들어 내는 인공현상을 모방한 최적화 알고리즘인 Harmony Search (HS; Geem *et al.*, 2001)를 이용하여 상충관계를 가지고 있는 2가지 이상의 목적함수를 고려할 수 있는 최적화 알고리즘이다. HS는 메타 휴리스틱 최적화 기법 중(*i.e.*, Genetic Algorithm,

Holland, 1992; Simulated Annealing, Kirkpatrick *et al.*, 1983; Ant Colony Optimization, Dorigo *et al.*, 2006) 최적화 과정이 간단하며, 상수도관망 최적 설계, 구조물 최적 설계 등 공학 문제에 다양하게 적용되고 있다.

최적의 화음을 만들기 위해 HS에서는 몇 가지 매개변수 (Harmony Memory Considering Rate, HMCR; Pitch Adjusting Rate, PAR; Harmony Memory Size, HMS; Bandwidth, Bw)가 필요하며, 최적해를 탐색하기 위해 무작위 생성, Harmony memory considering (HMC), Pitch adjustment (PA) 등의 해 탐색 기법이 사용된다. HMC 과정은 새로운 화음을 만들 때 기존 화음을 고려하는 최적해를 탐색하는 기법이며, PA 과정은 HMC를 통해 만들어진 해를 미세한 조정을 통해 해의 성능을 향상하는 기법이다. 이때, 미세한 조정 폭을 Bw라고 하며, MOHS는 기존 HS에 다양한 목적함수를 고려하여 다목적 최적해를 도출하기 위해 비지배해 정렬(Non-dominated Sorting; Fonseca and Fleming, 1993) 기법과 밀집 거리(Crowding distance; Deb *et al.*, 2000) 개념을 사용한다. 비지배해 정렬 기법을 사용하여 해의 지배 관계를 판단하여 비지배되는 해 집합을 최적해로 간주한다. 여기서 최적해 집합은 Pareto-optimal solutions이라고 한다. 또한, 비지배해 정렬을 통해 우선순위를 결정하고 우선순위가 같다면 해의 다양성 향상을 위하여 밀집 거리 개념을 도입하여 정규화 이후 Pareto-optimal solutions의 양 끝단의 해를 제외한 나머지 최적해 값 중에서 밀집 거릿값의 가장 큰 값을 보존한다.

Step. 1: MOHS의 탐색 과정 중 비지배해 정렬방법은 기존 HM의 해들에 대하여 지배 여부를 조사하여 각각의 해들의 순위를 결정한다.

Step. 2: 모든 최적해에 대하여 각각의 거리에 따른 최소-최대 정규화(Normalization Formula)를 Eq. (1) 계산하여 각각의 거리에 따른 밀집 거리를 Eq. (2) 계산한다.

Step. 3: 비지배해 정렬 순위가 같다면 동일 순위 내에서 Pareto-optimal solutions의 양 극값을 제외한 나머지를 해들의 밀집 거리를 계산하고, 계산된 해의 밀집 거리가 가장 작은 해를 도태시킨다.

Step. 4: 모든 개체에 순위가 결정될 때까지 반복 계산한다.

최소-최대 정규화는 각 목적함수의 가능해의 범위를 통일하여 효과적인 밀집 거리 계산을 가능하게 도와주는 작업이다. 각 목적함수의 값 중에서 가장 큰 값을 1로 가장 작은 값을 0으로 설정하여 나머지 해를 비율에 따라 0과 1사이 값으로

치환해주는 작업이며, 다음 식과 같다.

$$\text{Normailization Formula} = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \tag{1}$$

여기서, X 는 목적함수 X_{\min} 는 목적함수 중 가장 작은 값 X_{\max} 는 목적함수 중 가장 큰 값을 의미한다. 밀집 거리 방정식은 다음과 같다.

$$\text{Crowding distance} = |f_n(i) - f_n(k)| + |f_{n+1}(i) - f_{n+1}(k)| \tag{2}$$

여기서, $f_n(i)$ 는 솔루션 i 에서 n 번째의 목적함수의 값, $f_n(k)$ 는 솔루션 k 에서 n 번째의 목적함수의 값을 의미하며, 본 연구에서는 2가지 목적함수를 사용하여 밀집 거리를 계산하였다.

상수도관망을 설계함에 있어 용수의 사용성을 향상하기 위하여 비정상상태에서도 정상상태와 유사하게 운영이 가능하도록 시스템의 탄력성 최대화와 설계비용 최소화를 설계 목적함수로 설정하였다. 또한, 관망이 요구하는 최소압력과 한국의 수도법에 따른 잔류염소 농도를 설계 제한조건으로 고려하였으며, 압력만을 고려한 최적설계안과 압력과 잔류염소 농도를 고려한 최적설계안을 비교 분석하였다.

상수도관망 수리해석 및 수질해석을 하기 위해 미국 환경보호국이 제공하는 EPANET 2.0 프로그램(Rossman, 1994) 통해 수리해석과 수질해석을 EPS를 통해 해석하였다. 기간 확장 모의의 고려 기간은 14일(336 hr), Time step을 1시간으로 진행하였다. 수질해석 기간은 수원의 초기 유량이 마지막 절

점에 도달할 때까지의 시간과 용수가 관 말단에 도달하여 전체 고려 기간 중 잔류염소 농도가 안정화가 될 때까지의 시간을 고려하여 7일(168 hr)을 고려하였다. 따라서 본 연구에서는 MATLAB 프로그램을 활용하여 수질-수리 인자를 고려한 상수도관망 다목적 최적 설계기법을 구현하였다.

Fig. 1은 수리-수질 인자를 고려한 상수도관망 다목적 최적 설계의 흐름도를 나타낸다. 매개변수 민감도 분석을 통해 최적의 HMS, HMCR, PAR를 설정하였으며, 초기 하모니 메모리는 각 Benchmark 상수도관망에 해당하는 상업용 관경으로 무작위로 설정하였다. 무작위로 설정한 관경을 토대로 목적함수를 계산한 뒤 MOHS를 이용하여 최적 설계를 진행하였다. 제약조건 중 압력 조건은 모의시간 336시간 중 상수도관망이 요구하는 최소압력을 만족하지 못한다면 벌점함수를 주었으며, 수질 조건은 168시간 중 잔류염소 농도의 기준치를 만족하지 못한다면 벌점함수를 주었다. 마찬가지로 목적함수인 시스템의 탄력성 최대화는 336시간 중 모든 노드에서 최소압력 발생시간의 모든 노드의 압력 합을 통해 결정하였다.

2.2 목적함수

본 연구에서는 MOHS를 이용한 상수도관망 다목적 최적설계안을 도출하기 위하여 관경을 결정 변수(Decision Variable, DV)로 설정하였다. 이에 따른 목적함수로는 상충관계(Trade-off)가 존재하는 시스템의 탄력성 최대화, 설계비용 최소화를 설정하였다. 관경이 커질수록 상수도관망의 각 수용가에 유량의 공급 능력이 향상되어 시스템의 탄력성은 높아지겠지만, 마찬가지로 설계비용 역시 비약적으로 증가한다. 따라서 목적함수로는 시스템의 탄력성 최대화와 설계비용 최소화를

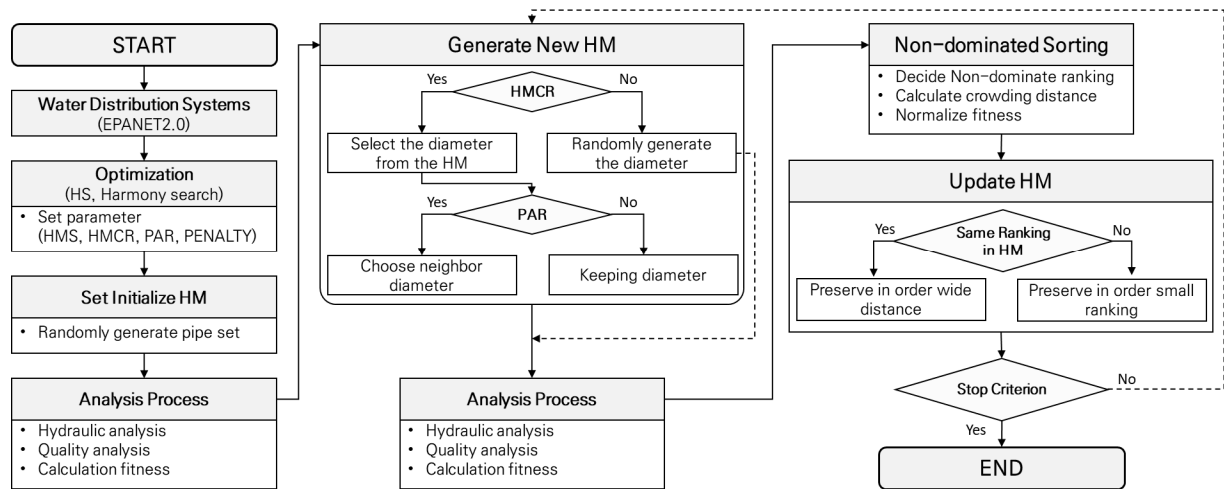


Fig. 1. Flowchart of multi-objective harmony search

목적함수로 설정하여 다목적 최적화를 진행하였다.

첫 번째로 고려한 목적함수로는 설계비용 최소화이다. 상수도관망 관로의 설계비용은 선형 비례한다고 가정한다 (Alperovits and Shamir, 1977). 따라서 상수도관망의 설계비용은 각 관의 단위 길이당 직경 별 비용에 대한 각 관로 길이의 곱들의 합으로 나타낼 수 있다(Eq. (3)).

$$Design\ Cost = \sum_{i=1}^N C(D_i)L_i \quad (3)$$

여기서 N 은 상수도관망의 파이프 개수이며 $C(D_i)$ 는 관로 i 의 단위 길이당 비용, L_i 는 관로 i 의 길이를 의미한다.

상수도관망 최적설계안을 도출할 때 수리학적 제약조건으로만 고려한다면 관망이 요구하는 최소압력을 만족하는 설계결과를 도출할 수 있지만 예측할 수 없는 자연재해 또는 인적재해로 인한 누수, 소방용수 사용으로 인한 사용량 급증 등 비정상상태에서의 사용성을 만족하는 설계안이 될 수 없다. 따라서 본 연구에서는 비정상상태에서도 정상상태처럼 유사하게 운영이 가능하도록 각 상수도관망이 요구하는 최소압력을 제외한 각 절점의 여유수두의 합의 최대화를 목적함수로 설정하여 비정상상태에 대비하는 설계안을 도출할 수 있다(Jung *et al.*, 2014). 시스템의 탄력성을 구하는 목적함수는 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$System\ Resilience = \sum_{j=1}^n (h_j - h_{min}) \quad (4)$$

여기서 n 은 상수도관망의 수원 및 탱크를 제외한 노드의 개수를 의미하며 h_j 는 j 번째의 노드에서의 압력, h_{min} 은 상수도관망이 요구하는 최소압력을 의미한다.

2.3 제약 조건

본 연구에서는 제약조건을 고려하는 방법으로 벌점함수를 크게 설정하여 기준에 만족하지 못한다면 반복계산 횟수가 증가할수록 도태되도록 구성하였으며, 제약조건을 만족한다면 벌점을 부여하지 않아 목적함수에 영향을 주지 않도록 설정하였다. 수리학적 제약조건은 고려 기간 동안 각 절점의 최소압력이 관망이 요구하는 최소압력보다 낮으면 절점의 최소압력에서 관망이 요구하는 최소압력을 뺀 값에 상수를 곱해 크게 작용시켰다(Eq. (5)). 수질 제약조건은 초기 수원에서의 유량이 관로를 통해 마지막 절점까지 가는 시간과 잔류염소 농도 변화폭이 안정화가 되는 시간을 고려하여 초기 7일(168

hr)로 고려하였다(Eq. (6)). 설정한 고려 기간 동안 각 절점에서의 최소 및 최대 잔류염소 농도가 기준치를 만족하지 못한다면 벌점함수를 크게 작용시켜 도태되도록 구성하였다.

$$Penalty_{press_i} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N (|h_i - h_{min}|) \times \alpha, & \text{if } h_i < h_{min} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$Penalty_{Quality_i} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (|Q_{i,min} - Q_{s,min}|) \times \beta, & \text{if } Q_{i,min} < Q_{s,min} \\ \sum_{i=1}^n (|Q_{i,max} - Q_{s,max}|) \times \beta, & \text{if } Q_{i,max} > Q_{s,max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 n 은 상수도관망의 수원 및 탱크를 제외한 노드의 개수를 의미한다. α 와 β 는 반복계산 시 도태될 수 있도록 하는 벌점 상수를 의미하며, 이 값들은 제한조건을 만족하였을 경우 관망의 설계비용보다 큰 값을 적용하여야 하므로 본 연구에서 적용한 3가지 관망의 설계비용을 고려하여 공통으로 10^{10} 을 사용하였다. h_i 는 i 번째의 압력을 의미하며 유량이 부족하거나 비정상상태가 된다면 음수 값이 나올 수 있으므로 절댓값을 취하였다. h_{min} 은 관망이 요구하는 최소압력이다. $Q_{i,min}$ 과 $Q_{i,max}$ 는 고려 기간 동안 가장 작은 잔류염소 농도와 가장 큰 잔류염소 농도를 뜻한다. $Q_{s,min}$ 과 $Q_{s,max}$ 는 절점의 최소, 최대 기준 잔류염소 농도이다.

2.4 상수도관망 형태 분류기법

과거 상수도관망 분류는 관망도의 형태만을 고려하여 판별하였기 때문에 정성적인 분류만 가능하였다. 하지만 점차 도시의 규모와 복잡성이 증가함에 따라 단순히 정성적 상수도관망 형태 분류방법으로는 상수도관망을 형식을 구분할 수 없으며, 수용가의 상수도 공급 서비스에 대한 다양한 인자(e.g., 신뢰성, 강건성, 탄력성)를 설계에 고려하기 위해서는 정량적인 상수도관망 형태 분류체계가 필요하다(Hwang and Lansley, 2017).

따라서 본 연구에서는 Hwang and Lansley (2017)에서 제안한 상수도관망 분류기법을 기반으로 상수도관망을 수지상식, 혼합식, 격자식 관망으로 분류하였다. 첫 번째로 Node-reduction algorithm으로 관망을 단순화하기 위하여 비필수 노드를 줄이는 작업을 수행하였다. 비필수 노드를 판별하기 위하여 전체 상수도관망에 대해 노드 등급을 부여하였다. 부여된 노드 등급을 이용하여 비필수 노드와 파이프를 삭제하였으며 각 노드가 다른 노드로 분기되지 않는다면 제거하였으

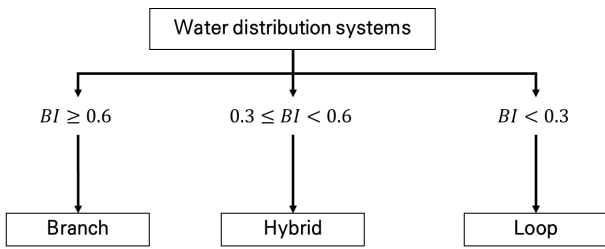


Fig. 2. Water distribution systems network categorize by Branch Index (BI)

며, 이를 토대로 Branch Index (BI)를 계산하였다. Eq. (7)의 BI는 수지상식, 혼합식, 격자식으로 분류하는 주요한 지수로 골격화를 수행한 상수도관망의 가장자리 노드의 개수와 기존 상수도관망의 분기된 가장자리 노드 개수의 비율이다(Hwang and Lansley, 2017).

Hwang and Lansley (2017)에서는 관망의 구분을 네트워크의 평균 환경에 따라 Distribution network systems, Transmission network systems로 구분하였으며, Distribution network systems에서 Branch Index를 사용하여 수지상식, 혼합식, 격자식, 관망으로 구분하였다. 위의 내용을 바탕으로 본 연구에서는 관망은 평균 환경보다는 네트워크 형상을 고려하여 구분하였기 때문에 적용한 네트워크를 Distribution network systems로 가정하였고, 이러한 이유로 인해 BI를 적용한 Network Categorization을 수행하였다.

$$BI = \frac{e_b}{e_r + e_b} \tag{7}$$

여기서 e_r 은 감소한 네트워크에서의 모서리 수, e_b 는 기존 관망의 모서리 수이며, Fig. 2은 BI에 따른 상수도관망을 수지상식, 혼합식, 격자식으로의 분류방법이다.

2.5 잔류염소 농도를 고려한 상수도관망 설계

본 연구에서는 각 상수도관망의 수원에서의 최적 염소 투입농도와 각 수용가의 잔류염소 농도를 만족하기 위하여 한국의 수도법 기준 잔류염소 농도의 기준치 최소 0.1 mg/L부터 최대 4.0 mg/L을 제약조건으로 설정하였으며, EPANET 2.0 프로그램을 통해 전체 모의시간에서의 노드의 잔류염소 농도가 만족하도록 설정하였다. 각 노드의 잔류염소 농도가 설정한 전체 모의시간 중 기준치에 만족하지 못하는 시간이 발생한다면 벌점함수를 부여하여 반복시안 시 도태되도록 구성하였다. 하지만 관망의 수요량, 노드의 수, 관의 개수가 같더라도 관망의 형식 및 특징에 따라 최적의 염소 투입농도 및 잔류염소 농

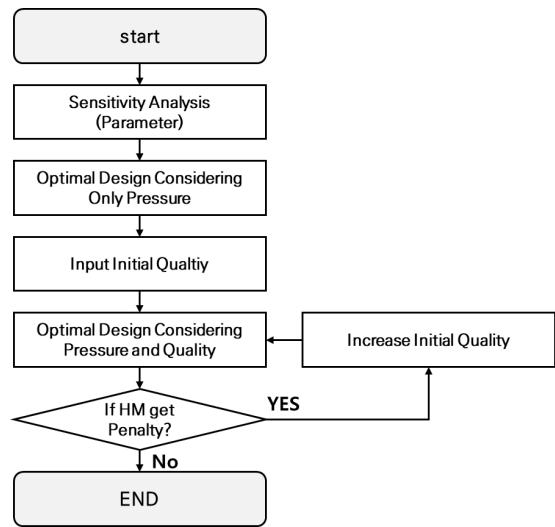


Fig. 3. Flowchart of initial quality

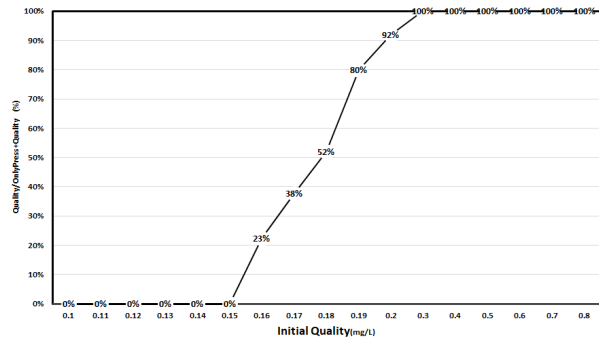


Fig. 4. Sensitivity analysis of Initial quality

도가 다르므로 관망의 형식 및 특징에 따라 분류하여 최적설계안을 도출하였다. 압력과 잔류염소 농도를 고려한 최적설계안과 압력만을 고려한 최적설계안을 비교 분석하였다.

또한, 효과적인 수원에서의 염소 투입농도를 산정하기 위하여 압력만을 고려한 최적설계안을 초기 하모니 메모리로 설정하여 수원에서의 염소 투입농도를 점차 증가하여 분석하였다. Fig. 3은 수원에서 최적의 염소 투입농도 결정을 위한 흐름도이다. 초기 민감도 분석을 통해 생성된 HMS, HMCR, PAR를 압력만을 고려한 최적설계안을 초기 하모니 메모리로 설정한 후 압력만을 고려한 최적설계안의 수원에 0.1 mg/L부터 4.0 mg/L씩 점진적으로 증가시키면서 초기 설정값이 벌점 상수가 목적함수에 고려되지 않을 때까지 수원의 초기 염소 투입농도를 증가시키면서 반복 계산하였다. Fig. 4는 수원에서의 투입염소량이 증가함에 따라 최적설계안이 도출되는 비율을 나타낸 그래프이다.

3. 모델 구축

본 연구에서는 상수도관망의 다양한 크기와 형식을 고려한 최적설계안을 도출하기 위하여 Hwang and Lansley (2017)의 관망 분류 기준을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 관망을 격자식, 수지상식, 혼합식 네트워크로 분류하였고, 이를 토대로 수질-수리 인자를 고려한 상수도관망 최적설계안을 도출하였다. 적용한 상수도관망의 Bulk Coefficient, Wall Coefficient는 온도와 관의 종류에 의해 결정되기 때문에 본 연구에서는 Bulk Coefficient를 주철관 기준 0.801로 설정하였으며, Wall Coefficient는 0.0801로 설정하였다(Choi and Wang, 1997; Chung *et al.*, 2006; Kowalska *et al.*, 2006; Ahn *et al.*, 2007). Hazen-Williams의 마찰계수와 Darcy-Weisbach 조도 계수는 주철관 기준 각각 130, 0.012로 설정하여 최적설계안을 도출하였으며, Table 1은 benchmark 상수도관망에 적용된 매개변수들을 의미한다.

상수도관망의 형식 및 특징에 따라 최적설계안을 비교분석하기 위해 적용된 상수도관망은 수지상식(Branch), 혼합식(Hybrid), 격자식(Loop) 관망을 적용하였으며, 적용 기준은 기존 상수도관망을 골격화(Skeletonized) 수행 후 BI에 따라 분류되었다. 세 종류로 분류된 상수도관망 형식에 따라 최적설계안을 수리 및 수질적 특징을 고려하여 비교 분석하였으며, 최적 설계 시 기존 연구에서 제한조건으로 사용한 절점의 압력만을 고려한 최적설계안과 본 연구에서 제안하고 있는 절점의

Table 1. The used parameters for applied WDSs

Hazen-Williams (c)	130	HMCR	0.95
Darcy-Weisbach (n)	0.012	PAR	0.05
Bulk Coefficient	0.801	Bw	1
Wall Coefficient	0.0801	Iteration	15,000
Duration Time	336 hr	Penalty	1015

압력과 잔류염소 농도를 제약조건으로 고려한 최적설계안 상수도관망의 형식 및 특징과 동시에 비교하여 분석하였다. 또한, 상수도관망의 형식 및 특징에 따른 수원에서의 염소 투입 농도와 각 노드에서의 잔류염소 농도 차이를 분석하기 위하여 압력만을 고려한 최적설계안을 MOHS의 초기 해로 설정하여 수원에서의 염소 투입농도를 점차 증가시키면서 기존 압력만을 고려한 최적설계안의 1순위 개수 중 제약조건인 잔류염소 기준치를 만족하는 개수의 비율을 그래프로 나타내었다.

3.1 Benchmark Networks

Benchmark 상수도관망은 관망 운영자 또는 설계자에게 성과 및 기대효과를 미리 알 수 있게 도와주는 수단이기도 하며 위험성을 미리 판단하여 수용가에 기존보다 나은 품질 제공할 수도 있으며, 개략적인 비용을 비교할 수 있으므로 비용의 효율성을 극대화함과 동시에 강점을 극대화할 수 있다. 하지만 Benchmark 상수도관망마다 형식과 특징이 다르므로 비슷한 관망을 같은 조건으로 최적 설계를 하더라도 형식 및 특징에 따라 극명하게 달라진다.

따라서 본 연구에서는 BI에 따라 상수도관망을 수지상식, 혼합식, 격자식 관망으로 분류하였으며, 적용한 상수도관망은 Anytown, Jilin, Net2 상수도관망이다. Fig. 5(a)는 Anytown 상수도관망은 Walski *et al.* (1987)에 의해 제안된 관망으로 BI는 0.03으로 격자식 관망이며, Fig. 5(b)는 Jilin 상수도관망(Bi and Dandy, 2014)으로 BI는 0.31로 혼합식 관망으로 분류하였다. 마지막으로 Fig. 5(c)는 Net2 상수도관망으로 Rossman *et al.* (1994)에 의해 처음 적용된 관망이며 실제 상수도관망을 모사한 관망으로 BI는 0.73으로 수지상식 관망으로 분류하였다. Table 2는 benchmark 상수도관망이 요구한 최소압력, 노드의 수, 관로의 개수와 BI에 따른 상수도관망 분류를 의미하며, Table 3은 각 benchmark 상수도관망의 관경에 대한 길이 당 비용을 의미한다.

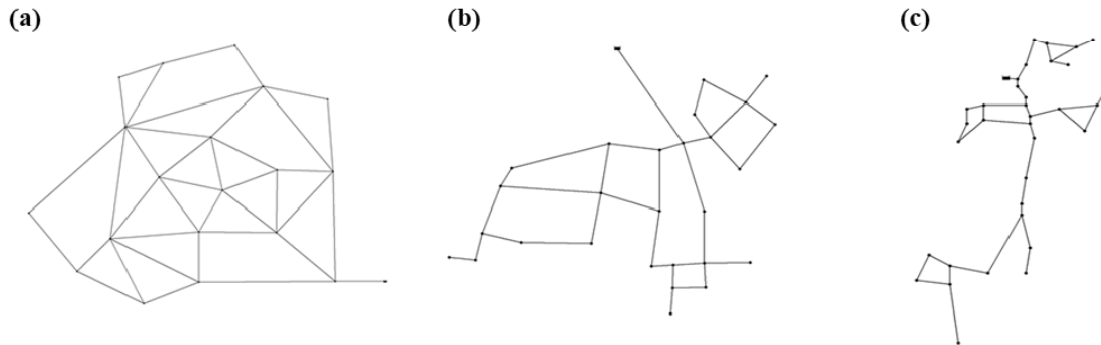


Fig. 5. Layout of benchmark networks (a) Anytown network, (b) Jilin network, (c) Net 2 network

Table 2. Network details and categorization results for the applied benchmark networks

Network details	Anytown network	Jilin network	Net 2 network
Flow Unit	GPM	LPS	GPM
Minimum Pressure	40 psi	15 m	40 psi
Node	19	27	34
Pipe	39	34	40
Search space	39 ¹⁰	27 ¹⁰	34 ¹⁰
e _r	34	8	19
e _b	1	18	7
Branch Index	0.03	0.31	0.73
Categorize	Loop	Hybrid	Branch

Table 3. Cost data for benchmark networks

Anytown network (Loop)		Jilin network (Hybrid)		Net 2 network (Branch)	
Diameter (inch)	Cost (USD)	Diameter (m)	Cost (USD)	Diameter (inch)	Cost (USD)
6	12.8	150	24.5	2	5.8
8	17.8	200	35.2	4	8.8
10	22.5	300	61.2	6	12.8
12	29.2	400	93.6	8	17.5
14	36.2	500	134.0	12	29.3
16	43.6	600	180.2	14	36.2
18	51.5	700	234.7	18	51.6
20	60.1	800	291.7	20	60.0
24	77.0	900	355.3	24	77.8
30	105.5	1000	426.7	30	106.1

4. 적용 및 결과

적용한 상수도관망 최적설계안의 비교는 우선 네트워크 형식에 따라 제약조건으로 압력만을 고려한 Sol. A와 압력과 최소-최대 잔류염소 농도를 제약조건을 고려한 설계안 Sol. B의 Pareto-optimal solutions를 비교 분석하였다. 본 연구에서 적용한 설계 인자로는 최소설계비용과 최대 시스템의 탄력성을 설정하였다. 초기 수원의 염소 투입농도는 0.1 mg/L부터 4.0 mg/L까지 최적설계안의 별점함수가 작용하지 않을 때까지 점진적으로 증가시키면서 수원에서의 최적 염소 투입농도를 산정하였다.

Figs. 6~8은 설계비용 최소화과 시스템의 탄력성 최대화를 목적함수로 고려하여 각 benchmark 상수도관망의 다목적 최적 설계의 결과인 Pareto-optimal solutions이다. 각 결과는 압

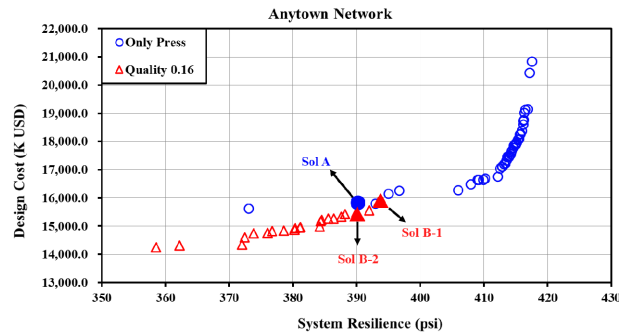


Fig. 6. Pareto-optimal solution of Anytown network

Table 4. Solution comparisons for Anytown network

Solution	Cost (K USD)	Resilience (psi)	Quality Satisfied	
Only Press	Sol. A	15,787	392.99	X
Quality 0.16	Sol. B-1	15,883	393.43	O
Quality 0.16	Sol. B-2	15,492	389.99	O
Difference	Sol. A and B-1	96	3.22	
	Sol. A and B-2	295	0.44	

력만을 제약조건으로 고려한 솔루션(파란색 심볼: O)과 수원에서 잔류염소 농도와 압력을 제약조건으로 고려한 솔루션(붉은색 심볼: △)을 비교하였으며, Tables 4~6은 각 benchmark 상수도관망에서 설계비용 또는 시스템의 탄력성이 유사한 두 솔루션을 선정하여 설계비용과 시스템의 탄력성을 비교한 결과이다.

Anytown 상수도관망의 압력과 최소-최대 잔류염소 농도를 제약조건으로 고려한 다목적 최적설계안은 수원에서의 최적 염소 투입농도가 0.16 mg/L일 때 비용은 15,492K USD (Sol. B-1) 15,883K USD (Sol. B-2)이며, 시스템의 탄력성은 389.99 psi (Sol. B-1), 393.43 psi (Sol. B-2)로 상수도관망의 필요 최소압력을 만족함과 동시에 최소최대 잔류염소 농도의 기준치를 만족한다. 하지만 압력만을 제약조건으로 고려한 최적설계안의 비용은 15,787K USD (Sol. A)이며, 시스템의 탄력성은 392.99 psi로 수원에서의 염소 투입농도를 0.16 mg/L로 설정하였을 때 최소최대 잔류염소 농도의 기준치를 만족하지 못하였다.

Jilin 상수도관망의 최소최대 잔류염소 농도를 고려한 최적설계안은 수원에서의 최적 염소 투입농도가 0.16 mg/L일 때 설계비용은 2,778K USD (Sol. B-1), 2,710K USD (Sol. B-2)이며, 시스템의 탄력성은 181.38 m (Sol. B-1), 176.97 m (Sol. B-2)로 상수도관망의 필요 최소압력과 잔류염소 최소최대 잔류염소 농도 기준치를 만족한다. 압력만을 제약조건으로 고

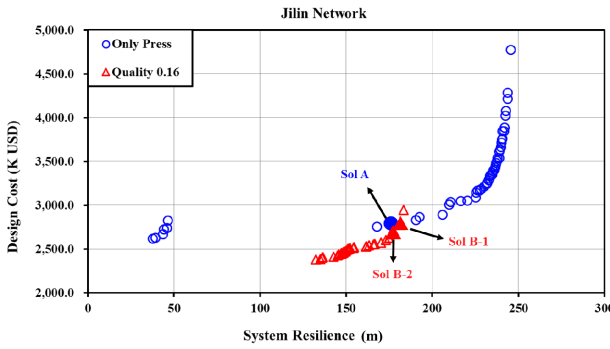


Fig. 7. Pareto-optimal solution of Jilin network

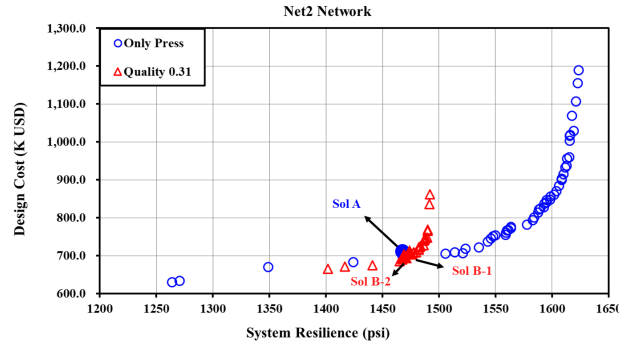


Fig. 8. Pareto-optimal solution of Net2 network

Table 5. The results of Jilin network

Solution		Cost (K USD)	Resilience (m)	Quality Satisfied
Only Press	Sol. A	2,780	176.46	X
Quality 0.16	Sol. B-1	2,778	181.38	O
Quality 0.16	Sol. B-2	2,710	176.97	O
Difference	Sol. A and B-1	2	4.92	
	Sol. A and B-2	70	0.51	

려한 최적설계안의 설계비용은 2,780K USD (Sol. A)이며, 시스템의 탄력성은 176.46 m이지만 수원에 염소 투입농도를 0.16 mg/L로 하였을 시에는 최소 잔류염소 농도의 기준치를 만족하지 못하는 결과를 얻었다.

Net 2 상수도관망의 최소·최대 잔류염소 농도를 고려한 최적설계안은 수원에서의 최적 염소 투입농도가 0.31 mg/L일 때 설계비용은 694K USD (Sol. B-1), 690K USD (Sol. B-2)이며, 시스템의 탄력성은 1,470.80 psi (Sol. B-1), 1,467.42 psi (Sol. B-2)로 상수도관망의 필요 최소압력과 최소최대 잔류염소 농도 기준치를 만족한다. 압력만을 제약조건으로 고려한 최적설계안의 설계비용은 697K USD (Sol. A)이며, 시스템의 탄력성은 1,467.96 m이지만 최소최대 잔류염소 기준치와 마찬가지로 수원에 염소 투입농도를 0.31 mg/L로 하였을 시에는 최소 잔류염소 농도의 기준치를 만족하지 못하는 결과를 얻었다.

종합적인 결과를 확인하였을 때 압력만을 고려한 최적설계안에 비해 압력과 잔류염소 농도를 고려한 최적설계안의 해의 다양성이 부족하며, 설계비용 측면에서 수렴성이 우수한 것으로 판단된다. 이는 잔류염소 농도의 제약조건을 만족하기 위하여 최적설계안이 가능해 영역이 국부적이므로 설계비용 측면 수렴성이 증가한 것으로 판단된다. 전체적인 관경이 증가한다면 시스템의 탄력성은 향상되지만, 유속이 감소되고 체류 시간의 증가로 인해 잔류염소 농도를 만족하지 못한다. 따라서 제한된 관경의 크기에 따라 압력과 잔류염소 농

Table 6. The results of Net2 network

Solution		Cost (K USD)	Resilience (psi)	Quality Satisfied
Only Press	Sol. A	697	1,467.96	X
Quality 0.16	Sol. B-1	694	1,470.80	O
Quality 0.16	Sol. B-2	690	1,467.42	O
Difference	Sol. A and B-1	70	2.84	
	Sol. A and B-2	6	0.54	

도를 고려한 최적설계안이 압력만을 고려한 최적설계안보다 가능해의 영역이 비교적 좁은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 이를 증명하기 위하여 benchmark 상수도관망인 Anytown의 상수도관망을 수원에서의 염소 투입농도를 증가시켜 최적설계안이 도출하기 시작한 0.16 mg/L부터 0.01 mg/L씩 증가시켜 도출된 최적설계안이다. 이를 통해서 수원에서의 염소 투입농도가 증가할수록 관의 직경을 크게 설정할 수 있으며, 0.2 mg/L 이상을 투입한다면 압력만을 고려한 최적설계안과 유사한 최적설계안이 도출된다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 상수도관망의 형식 및 특징인 BI 지수에 따라 상수도관망을 분석하기 위해 압력만을 고려한 최적해 중 수질조건을 만족하는 해의 비율을 나타내었다. 각 Benchmark 상수도관망의 압력 제한조건만을 고려한 최적설계안을 초기 HM으로 고정 후, 수원에서의 염소 투입농도를 0.01 mg/L씩 점진적으로 증가하여 전체 HM에서 수리-수질 제약조건을 만족하는 해 개수의 비율을 산정하여 그래프로 나타내었다. 격자식 관망인 Anytown 상수도관망의 경우 수원에서 염소 투입농도를 0.17 mg/L로 설정하였을 때부터 제한조건을 만족하는 가능해를 도출하였으며 염소 투입농도가 증가할수록 그래프의 기울기도 급하게 증가하는 모습을 볼 수 있었다. 수지상식인 Net 2 상수도관망은 수원에서의 염소 투입농도가 증가할수록 기울기는 증가하지만, 격자식 관망과는 다르게 완만한 그래프를 그리고 있으며, 혼합식 관망인 Jilin 상수도관망은 격

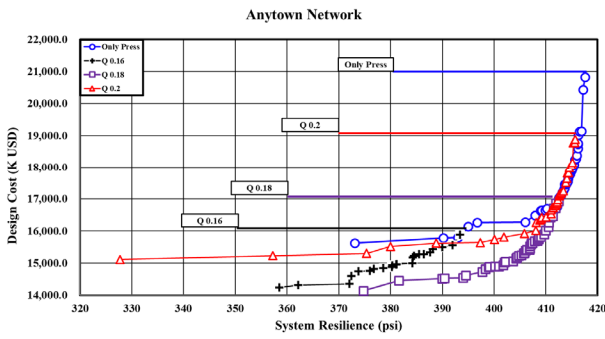


Fig. 9. Pareto-optimal Solution according to initial quality

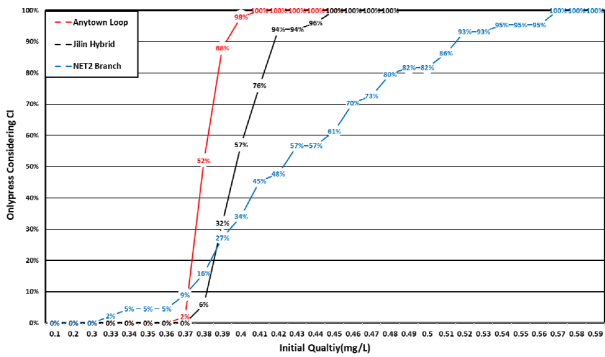


Fig. 10. The ratio of Pareto-optimal solutions that satisfy the residual chlorine standard among the optimal solutions considering only the pressure constraints

자식과 수지상식의 사이의 그래프를 그리고 있다. 따라서, Fig. 10을 통해 BI가 높을수록 기울기는 작아지며, BI와 기울기는 반비례 관계에 있음을 확인할 수 있었다.

공통으로 격자식, 혼합식, 수지상식 관망 모두 설계 인자인 목적함수 시스템의 탄력성 최대화를 만족하기 위하여 수원에서의 가까운 관경은 최댓값으로 설정되어 있었으며, 압력만을 제약조건으로 고려하였을 때 잔류염소 기준치를 만족하지 못하는 노드를 해결하기 위하여 주변 관경의 크기뿐만 아니라 전반적인 관경의 크기가 변화한 것을 확인할 수 있었다. 격자식 상수도관망의 경우 수원에서 가장 멀리 떨어져 있는 노드 (i.e., 고려 기간 중 압력이 가장 낮은 노드)까지 물이 도달하는데 수지상식 관망보다 비교적 짧은 것을 확인할 수 있었으며 이에 따라 체류 시간이 길어지게 되고, 잔류염소의 분해가 빨라져 잔류염소 기준치를 만족하지 못하였다.

5. 결론

본 연구에서는 MOHS를 이용한 benchmark 상수도관망 최적 설계들을 BI에 따른 형식과 특징을 분류하여 최소최대

잔류염소 농도를 고려한 관망 내 설계비용 최소화과 관망 시스템의 탄력성 최대화에 대한 최적설계안을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 내렸다.

Anytown, Jilin, Net 2의 상수도관망을 압력만을 고려한 최적설계안과 압력과 최소최대 잔류염소 농도를 고려한 최적설계안을 비교하였을 때 격자식인 Anytown 상수도관망의 경우 설계비용 측면(Sol. A and B-1) 설계비용 차이는 96,002.85 USD, 시스템의 탄력성 차이는 3.22 psi이며, 시스템의 탄력성 측면(Sol. A and B-2) 설계비용 차이는 294,595.17 USD, 시스템 탄력성 차이는 0.44 psi이지만, 압력만을 고려한 최적설계안 모두 최소최대 잔류염소 농도를 만족하지 못하는 결과를 도출하였다. 그 이유는 상수도관망의 최소 필요 압력을 만족하는 동시에 시스템의 탄력성을 최대화하기 위하여 수원 근처 관경의 크기는 커지지만, 유속과 밀접한 관계가 있는 잔류염소 농도는 유량이 같다는 가정하에 관경이 커질수록 유속이 느려져 체류 시간이 길어진다. 따라서 최소 잔류염소 농도 기준치를 만족하지 못하는 결과 값을 도출하였다. 또한, 관망의 형식 및 특징에 따라 압력만을 고려한 최적설계안을 초기 HM으로 고정 후 수원에서 염소 투입농도를 점진적으로 증가시킨 그래프(Fig. 10)의 기울기를 통해 정량적 평가를 한 결과 격자식 그래프의 기울기가 25이며, 수지상식 관망인 Net 2의 그래프의 기울기는 3.7 정도로 6.75배 커진 것을 확인할 수 있었으며 그 이유는 한 노드에서 오는 물이 다분화 되어 있어 염소 투입농도가 증가할수록 최소 잔류염소 농도의 그래프 기울기가 비약적으로 커지는 결과를 도출할 수 있었다.

향후 연구에서는 관망의 잔류염소 농도를 고려한 형식 및 특징뿐만 아니라 관망의 크기에 따른 관망 최적 설계를 하여, 관망의 크기에 따른 격자식, 혼합식, 수지상식 그래프를 정량적으로 평가가 수행되어야 할 것이다. 또한, 탱크운영에 따른 탱크내 체류 시간, 펌프운영에 따른 체류 시간 등을 고려하여 좀 더 실무에 현실적인 설계가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2021R1G1A1003295)입니다.

References

Ahn, J.C., Lee, S.W., Rho, B.S., Choi, Y.J., Choi, J.H., Kim, H.I., Park, T.J., Park, C.M., Park, H., and Koo, J.Y. (2007). "Modeling

- residual chlorine and THMs in water distribution system.” *Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 29, No. 6, pp. 706-714.
- Alperovits, E., and Shamir, U. (1977). “Design of optimal water distribution systems.” *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 6, pp. 885-900.
- Bi, W., and dandy, G.C. (2014). “Optimization of water distribution systems using online retrained metamodels.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 11.
- Cembrowicz, R.G. (1992). *Water supply systems optimization for developing countries*. Pipeline Systems, Springer, Dordrecht, pp.59-76.
- Choi, J., and Wang, C. (1997). “Simulation of hydraulics and water quality for water distribution system in model city using EPANET.” *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 19, No. 7, pp. 915-928.
- Choi, Y.H., and Kim, J.H. (2019). “Development of multi-objective optimal redundant design approach for multiple pipe failure in water distribution system.” *Water*, Vol. 11, No. 3, 553.
- Choi, Y.H., Jung, D., Lee, H.M., Yoo, D.G., and Kim, J.H. (2017). “Improving the quality of pareto optimal solutions in water distribution network design.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 143, No. 8, 04017036.
- Choi, Y.H., Lee, H. M., Yoo, D.G., and Kim, J.H. (2015). “Optimal design of water supply system using multi-objective harmony search algorithm.” *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 29, No. 3, pp. 293-303.
- Chung, W.-S., Kim, I.-T., and Lee, H.-D. (2006). “Effective application of chlorine decay coefficient for EPANET.” *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 1431-1438.
- Cotruvo, J.A. (2017). “2017 WHO guidelines for drinking water quality: First addendum to the fourth edition.” *Journal American Water Works Association*, Vol. 109, No. 7, pp. 44-51.
- Dandy, G.C., Simpson, A.R., and Murphy, L.J. (1996). “An improved genetic algorithm for pipe network optimization.” *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 449-458.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meyarivan, T. (2000). “A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II.” *International Conference on Parallel Problem Solving From Nature*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 849-858.
- Dorigo, M., Birattari, M., and Stutzle, T. (2006). “Ant colony optimization.” *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol. 1, No. 4, pp.28-39.
- Eusuff, M.M., and Lansey, K.E. (2003). “Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 3, pp. 210-225.
- Fonseca, C.M., and Fleming, P.J. (1993). “Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation discussion and generalization.” *Proceedings of fifth In International Conference*, San Mateo, CA, U.S., Vol. 93, pp. 416-423.
- Geem, Z.W. (2006). “Optimal cost design of water distribution networks using harmony search.” *Engineering Optimization*, Vol. 38, No. 03, pp. 259-277.
- Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, G.V. (2001). “A new heuristic optimization algorithm: Harmony search.” *Simulation*, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68.
- Gupta, I., Hassan, M.Z., and Cook, J. (1972). “Linear programming analysis of a water supply system with multiple supply points.” *AIIE Transactions*, Vol. 4, No. 3, pp. 200-204.
- Holland, J.H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press, MA, U.S.
- Hong, A.R., Lee, H.M., Choi, Y.H., Choi, J.H., and Kim, J.H. (2016). “Application and comparison of genetic algorithm and harmony search algorithm for optimal cost design of water distribution system.” *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 521-521.
- Hwang, H. (2018). *Sustainable, robust, and resilient water resources planning and management*. Ph. D. dissertation, University of Arizona, Tucson, AZ, U.S., pp.14-23.
- Hwang, H., and Lansey, K. (2017). “Water distribution system classification using system characteristics and graph-theory metrics.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 143, No. 12, 04017071.
- Jung, D., Lansey, K.E., Choi, Y.H., and Kim, J.H. (2016). “Robustness-based optimal pump design and scheduling for water distribution systems.” *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 18, No. 3, pp. 500-513.
- Jung, D., Lee, S., and Hwang, H. (2019). “Optimization difficulty indicator and testing framework for water distribution network complexity.” *Water*, Vol. 11, No. 10, 2132.
- Jung, D., Chung, G., and Kim, J.H. (2010). “Optimal design of water distribution systems considering uncertainties in demands and roughness coefficients.” *In Water Distribution Systems Analysis 2010*, KOSHAM, pp. 1390-1399.
- Jung, D.H., Kang, D.S., Kim, J.H., and Lansey, K. (2014). “Robustness-based design of water distribution systems.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 11, 04014033.
- Kang, D., and Lansey, K. (2009). “Real-time demand estimation and confidence limit analysis for water distribution systems.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 10, pp. 825-837.
- Kim, J.H., Kim, T.G., Kim, J.H., and Yoon, Y.N. (1994). “A study on the pipe network system design using non-linear programming.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 27, No. 4, pp. 59-67.
- Kim, K., Hyung, J., Seo, J., Shin, H., and Koo, J. (2017). “Development of an optimal operation model of residual chlorine concentration in water supply system.” *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 31, No. 6, pp. 587-597.
- Kim, K.B., Seo, J.W., Hyung, J.S., Kim, T.H., Choi, T.H., and Koo, J.Y. (2020). “Development of optimization model for booster chlorination in water supply system using multi-objective optimization method.” *Journal of Korean Society of Water*

- and Wastewater*, Vol. 34, No. 5, pp. 311-321.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., and Vecchi, M.P. (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680.
- Kowalska, B., Kowalski, D., and Musz, A. (2006). "Chlorine decay in water distribution systems." *Environment Protection Engineering*, Vol. 32, No. 2, pp. 5-16.
- Lansley, K., Pasha, F., Pool, S., Elshorbagy, W., and Uber, J. (2007). "Locating satellite booster disinfectant stations." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 133, No. 4, pp. 372-376.
- Lee, S.M., Yoo, D.G., and Kim, J.H. (2019). "Optimal control technology of residual chlorine concentration in water supply process using optimization technique." *Jouran of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 67, No. 12, pp. 83-89.
- Mu, T., Ye, Y., Tan, H., and Zheng, C. (2021). "Multistage iterative fully automatic partitioning in water distribution systems." *Water Supply*, Vol. 21, No. 1, pp. 299-317.
- National Research Council (NAP) (2007). *Drinking water distribution systems: Assessing and reducing risks*. National Academies Press, Washington, D.C., U.S., pp. 31-50.
- Noh, Y.R., and Park, J.H. (2017). "Mathematical model simulations assessing the effects of temperature on residual chlorine concentrations in water storage tank." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 33, No. 2, pp. 187-196.
- Ostfeld, A. (2004). "Reliability analysis of water distribution systems." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 6, No. 4, pp. 281-294.
- Quindry, G.E., Brill, E.D., and Liebman, J.C. (1981). "Optimization of looped water distribution systems." *Journal of the Environmental Engineering Division*, Vol. 107, No. 4, pp. 665-679.
- Rossman, L.A. (1994). *EPANET users manual*. U.S. Environmental Protection Agency, OH, U.S.
- Rossman, L.A., Clark, R.M., and Grayman, W.M. (1994). "Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 120, No. 4, pp. 803-820.
- 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*, Vol. 123, No. 2, pp. 67-77.
- Seo, J.W., Kim, K.B., Hyung, J.S., and Kim, T.H. (2019). "Optimization model for location and operation schedule of chlorine booster stations in water distribution networks." *Desalination and Water Treatment*, Vol. 140, pp. 91-102.
- Shamir, U. (1974). "Optimal design and operation of water distribution systems." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 27-36.
- Shin, H.G., and Park, H.K. (1998). "Optimal design of water distribution networks using the genetic algorithms (I)-Cost optimization." *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 12, No. 1, pp. 70-80.
- Shokoohi, M., Tabesh, M., Nazif, S., and Dini, M. (2017). "Water quality based multi-objective optimal design of water distribution systems." *Water Resources Management*, Vol. 31, No. 1, pp. 93-108.
- Siew, C., and Tanyimboh, T.T. (2010). "Pressure-dependent EPANET extension: extended period simulation." *In Water Distribution Systems Analysis 2010*, AZ, U.S., pp. 85-95.
- Siew, C., Tanyimboh, T.T., and Seyoum, A.G. (2016). "Penalty-free multi-objective evolutionary approach to optimization of Anytown water distribution network." *Water Resources Management*, Vol. 30, No. 11, pp. 3671-3688.
- Walski, T.M., Brill, JR, E.D., Gessler, J., Goulter, A.M., Roland M., Jeppson, M., Lansley, K., Lee, H.L., Liebman, J.C., Mays, L., Morgan, D.R., and Ormsbee, L. (1987). "Battle of the network models: Epilogue." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 113, No. 2, pp. 191-203.
- Yates, D., Templeman, A., and Boffey, T. (1984). "The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks." *Engineering Optimization*, Vol. 7, No. 2, pp. 143-155.
- Yazdi, J., Choi, Y.H., and Kim, J.H. (2017). "Non-dominated sorting harmony search differential evolution (NS-HS-DE): A hybrid algorithm for multi-objective design of water distribution networks." *Water*, Vol. 9, No. 8, 587.
- Yoo, D.G., Lee, S.M., Lee, H.M., Choi, Y.H., and Kim, J.H. (2018). "Optimizing re-chlorination injection points for water supply networks using harmony search algorithm." *Water*, Vol. 10, No. 5, 547.