



## Optimal valve installation of water distribution network considering abnormal water supply scenarios

Lee, Seungyub<sup>a</sup> · Jung, Donghwi<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>Postdoctoral Research Associate, Department of Civil and Architectural Engineering and Mechanics, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA

<sup>b</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea

Paper number: 19-074

Received: 13 September 2019; Revised: 27 September 2019; Accepted: 27 September 2019

### Abstract

Valve in water distribution network (WDN), that controls the flow in pipes, is used to isolate a segment (a part of WDN) under abnormal water supply conditions (e.g., pipe breakage, water quality failure event). The segment isolation degrades pressure and water serviceability in neighboring area during the water service outage of the segment. Recent hydraulic and water quality failure events reported encouraging WDN valve installation based on various abnormal water supply scenarios. This study introduces a scenario-based optimal valve installation approach to optimize the number of valves, the amount of undelivered water, and a shortest water supply path indicator (i.e., Hydraulic Geodesic Index). The proposed approach is demonstrated in the valve installation of Pescara network, and the optimal valve sets are obtained under multiple scenarios and compared to the existing valve set. Pressure-driven analysis (PDA) scheme is used for a network hydraulic simulation. The optimal valve set derived from the proposed method has 19 fewer valves than the existing valve set in the network and the amount of undelivered water was also lower for the optimal valve set. Reducing the reservoir head requires a greater number of valves to achieve the similar functionality of the WDN with the optimal valve set of the original reservoir head. This study also compared the results of demand-driven analysis (DDA) and the PDA and confirmed that the latter is required for optimal valve installation.

**Keywords:** Water Distribution Network (WDN), Graph theory, Optimal valve installation, Abnormal water supply scenarios, Hydraulic Geodesic Index (HGI)

## 비정상 물공급 시나리오를 고려한 상수도관망 최적 밸브위치 결정

이승엽<sup>a</sup> · 정동휘<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>에리조나대학교 건축토목공학과 박사후과정, <sup>b</sup>계명대학교 토목공학과 조교수

### 요 지

상수도 관망 밸브는 평상시 관로의 유량을 변경하는 역할을 하지만, 관로 파손, 수질 문제 등 사고 발생 시 해당 구역을 격리하는데에도 이용된다. 밸브 조작에 의한 구역 단수는 주변 지역의 압력 및 물 공급 성능 저하를 유발한다. 최근 안정적인 상수도 관망 물 공급을 위협하는 사고가 다양하고 빈번하게 발생하고 있으며, 이에 따라 다양한 시나리오를 고려하여 밸브 위치 결정을 하는 것이 필요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 밸브의 개수, 구역 격리 시 물 부족량, 수리학적 거리 인자(Hydraulic Geodesic Index, HGI)를 통합한 목적함수를 개발하고, 다양한 물 부족 시나리오에 기반한 밸브 최적 위치 결정 방법론을 제안한다. 제안한 방법론은 페스카라 관망에 적용되었으며, 시나리오별로 도출된 최적 밸브 설계안의 차이점을 분석하였다. 최적 밸브 위치 탐색 과정 중 수행된 관망 수리해석은 압력 기반(Pressure Driven Analysis, PDA)으로 수행하였다. 개발된 방법론으로 도출한 최적 밸브 설계안은 기존 설계안 대비 밸브 개수가 최대 19개나 적었고, 세그먼트 격리 시 물 공급 부족량 또한 상대적으로 작았다. 수원 수두가 낮은 시나리오를 고려할수록 더 많은 밸브가 설치되었는데, 밸브 추가 설치에 따른 비용증가는 다양한 시나리오에서 물 공급 성능 향상으로 이어짐을 확인하였다. 또한, 세그먼트 격리 상황 모의를 압력 및 유량 기반 해석으로 수행한 결과를 비교하여, 밸브 최적 위치 설계 수행 시 압력 기반 해석이 필요함을 확인하였다.

**핵심용어:** 상수도관망, 그래프이론, 최적 밸브 위치 결정, 비정상물공급 시나리오, Hydraulic Geodesic Index (HGI)

\*Corresponding Author. Tel: +82-53-580-5706  
E-mail: donghwiku@gmail.com (D. Jung)

## 1. 서론

상수도 관망은 다양한 구성요소를 통해서 각종 수원지에서 취수한 물을 적정 수압과 수질을 유지하여 수용가로 전달하는 역할을 한다(Ministry of Environment, 2010). 따라서, 이를 적절히 유지 및 관리하는 것은 인간 생활의 영위에 있어 중요한 임무라고 할 수 있다. 상수도 관망의 효율적인 운영을 위해서는 각 구성요소를 어떻게 배치하고 어떤 경로로 물을 운반하는가에 대한 사항, 즉 연결성(connectivity)이 중요한 고려사항 중 하나이다. 그러나 최근 노후화와 지진으로 인한 관로 파손이 증가하고 있고, 인천, 포항 등 국내 도시에서 발생한 적수와 같은 수질 문제 등으로 인해 상수도 관망 효율적인 운영에 어려움이 발생하고 있다. 그뿐만 아니라 기후 변화에 따른 가뭄은 수원지에서 취수 가능한 수량을 저감하고, 결국은 수용가에서 사용할 수 있는 물의 양도 줄어들게 된다(Kim and Jun, 2013). 즉, 국내 상수도 관망은 현재 이러한 교란(disturbance) 요소 및 관 파손과 수질 악화와 같은 비정상 상황으로 인해 최적의 운영 상태를 유지하는 것이 어려워지고 있다(Shin *et al.*, 2018).

이러한 비정상 상황들은 교란 요소 및 상수도 관망의 피해 정도에 따라 다른 방법으로 해결될 수 있다. 관의 물리적인 파손의 경우 대부분 파손된 관로의 교체 및 보수로 해결할 수 있고, 적수와 같은 수질 문제는 수질 문제가 발생한 구역의 플러싱(flushing) 등과 같은 방법으로 상수도 관망의 성능을 회복할 수 있다(Rana and Boccelli, 2016; Lee *et al.*, 2019). 다만, 이와 같은 회복 과정은 해당 관로 혹은 구획의 단수가 필요하며, 단수에 따른 상수도 관망 물 공급 성능 저하를 최소화할 필요가 있다(Giustolisi and Savic, 2010; Creaco *et al.*, 2012). 단수의 경우 다수의 밸브를 통해 효과적으로 구획을 분할하여야 하지만, 실질적으로 밸브의 수가 충분치 않아 물 공급 성능 저하가 불가피한 경우가 있다(Creaco *et al.*, 2010; Giustolisi and Savic, 2010). 또한 상수도 관망의 성능을 위협하는 교란이 점점 더 다양해지고 빈번한 상황에서 기존의 설계가 물 공급 성능 저하를 최소화한다고 보장할 수 없는 실정이다(Shin *et al.*, 2018). 따라서, 효율적인 회복 및 회복 중 상수도 관망의 성능을 최대한 유지하기 위해 상수도 관망에서 최적 밸브 위치 선정 시 다양한 교란 요소를 고려하도록 선정하는 것은 더 큰 피해를 예방하기 위해 매우 중요하다.

현재까지, 밸브 위치 결정 문제는 대부분 세그먼트(segment)와 DMA (distracted metering area) 분할을 위해 적용되었다. Jun and Loganathan (2007)은 세그먼트 탐색 알고리즘 및 간접 고립 지역을 찾는 알고리즘을 그래프 이론에 기반하여 제

안하였고, Alvisi *et al.* (2011)의 경우 수리해석과 동시에 세그먼트를 찾을 수 있는 알고리즘을 제안한 바 있다. 참고로, 간접 고립 지역이란, 직접 격리된 세그먼트의 차폐에 의해 의도치 않게 용수공급이 차단되는 지역을 말한다. Creaco *et al.* (2010), Giustolisi and Savic (2010)와 Choi *et al.* (2018)은 상수도 관망의 신뢰성(reliability) 혹은 강건성(robustness)을 높이기 위한 밸브 최적 위치를 결정하는 모형을 개발한 바 있다. 이외에도 Jowitt and Xu (1990)과 Araujo *et al.* (2006)은 상수도 관망의 압력 관리를 통해 누수를 줄일 수 있는 밸브 최적 위치와 운영 방안을 결정하는 모형을 제안하였고, Kang and Lansey (2009)는 수질 개선을 위해 실시간 밸브 운영을 결정하는 등 다양한 측면에서 밸브의 최적 위치 결정 및 운영 방안을 제안한 사례가 있다. 국내에서도 Jun (2005)이 상수도 관망의 효율성 지수를 제안하며 밸브에 의한 관의 부분적 격리에 대해 분석한 바 있고, Jun (2006)은 이를 확장하여 밸브의 차폐로 인해 발생할 수 있는 상수도 관망의 직간접 고립 피해 영역을 산정할 수 있는 방법론을 제안하였다. 또한, Jun *et al.* (2007b)의 경우 minimum cutset 방법을 통해 각 세그먼트별 신뢰성을 추정한 바 있다. 최근에 Lim and Kang (2019)은 밸브의 차폐에 따른 직간접 고립 지역에서 단수 용량과 밸브 설치비용을 고려한 밸브 위치 결정 방법론을 제안하였다.

상기 문헌들은 모두 유량기반 해석(demand-driven analysis; DDA)에 근간한 EPANET 모형(Rossman, 2000)을 사용하여 설계를 진행하였고, 이에 따라 격리된 세그먼트의 요구 수량(EPANET상의 Base demand)만큼 물 공급 부족분으로 산정되었다. 하지만, 격리된 세그먼트 외 부분에서 최소 수압 조건이 만족하지 않으면 요구 수요량이 전달되지 않을 가능성이 있다(Creaco *et al.*, 2012). 이러한 비정상상태(abnormal condition)를 고려하기 위해, Creaco *et al.* (2012)는 밸브를 이용하여 상수도 관망의 격리 시 격리되지 않은 구역에서의 압력 변화로 제한된 물 공급을 압력 기반 해석(pressure-driven analysis, PDA)에 근간한 EPANET 모형으로 밸브의 최적 위치를 결정한 바 있다.

상수도 관망의 구성요소는 점(수원, 수용가, 탱크)과 선(관, 펌프, 밸브)으로 간략화될 수 있으며 이때의 형태가 평면 그래프와 유사하다. 따라서, 그래프의 구조해석을 하는 연구인 그래프 이론이 상수도 관망의 연결성을 고려해 주기 위해 적용되었다(Yazdani and Jeffrey, 2011). 특히 밸브의 개폐 여부에 따라 상수도 관망의 연결성이 변경되며 이를 활용한 밸브 및 관망의 구역화(sectorization) 혹은 DMA를 설계한 사례가 있다. Di Nardo *et al.* (2013)는 그래프 이론 인자를 이용하여 에너지 손실을 최소화하도록 관망의 구역화를 진행하였다.

Herrera *et al.* (2016)의 경우 회복력(resilience)을 극대화하기 위해 그래프 이론에 기반한 K 번째 최단 경로를 소개하였으며, 이를 이용하여 DMA를 구축하였다. Hajebi *et al.* (2016) 다양한 그래프 이론 인자들을 이용하여 관망의 구역을 결정하였다. 다만, 밸브의 최적 위치 결정에 그래프이론을 직접적으로 고려한 사례를 확인하기는 어려웠다. 또한 상수도 관망이 다양한 교란에 노출되어 있지만, 대부분의 선행 연구에서는 다양한 시나리오 하에서 밸브 위치를 결정하기 보다 정상 상태의 단일 시나리오만 고려하여 다양한 교란에 대한 효용성을 확인하기 어려운 단점이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 시나리오에 기반한 밸브의 최적 위치를 결정하는 방법론을 소개한다. 밸브의 최적 위치는 그래프 이론 기반의 인자인 수리학적 거리 인자(Hydraulic Geodesic Index, HGI)와 밸브의 개수, 격리 시 물 부족분(신뢰성)에 동등한 가중치를 부여하여 구축한 단일 목적함수로 결정하였다. 밸브의 개수는 모든 밸브의 비용이 동일하다는 가정하에 적은 수의 밸브가 적은 비용임을 반영하기 위해 사용하였으며, 격리 시 물 부족분은 EPANET의 압력 기반 해석 확장 버전을 사용하여 산정하였다. 수리학적 거리 인자는 Lee and Jung (2018)에서 소개한 SNSP (Source-to-Node Shortest Pathway)와 동일한 가정과 개념이지만, 개념에 대한 의미의 효율적 전달을 위해 인자의 이름이 수정되었다. SNSP는 에너지 효율 및 회복력과 상관관계가 높은 것으로 확인되었으며, 동일한 개념인 수리학적 거리 인자 또한 동일한 상관관계를 가지는 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 가뭄으로 인한 물 공급원(수원)에 이상이 생긴 경우를 시나리오로 설정하였고, 수리학적 시 EPANET 상 수원(reservoir)의 수두를 조절하는 것으로 모의를 하였다. 수두 조건은 수원의 기존 수두 조건과 수원의 수두 저감 조건 중 두 가지를 고려하였으며, 결과 비교 및 분석을 통해 시나리오의 필요성을 확인하였다.

## 2. 수리학적 거리를 이용한 밸브 최적 설계 모형

본 연구의 목적은 다중 시나리오의 고려 시 결정된 밸브 최적 위치를 비교하여 시나리오의 필요성을 확인하는 것이다. 최적화를 위해 가중 그래프 이론에 근간한 수리학적 거리 인자와, 신뢰성, 밸브의 개수 세 가지 고려사항을 균등하게 가중치를 부여하여 단일 목적함수로 구축하였다. 최적화 모형은 Revised Harmony Search (ReHS)를 사용하였으며(Lee *et al.*, 2018), 이는 기존 화음탐색법(Harmony Search)의 매개변수의 적용을 수정한 모형이다. 본 절에서는 밸브 위치에 따른

세그먼트 식별 모형, 수리학적 거리 인자, 그리고 목적 함수를 소개한다. 본 연구에서 개발한 모형은 Python으로 작성되었다.

### 2.1 세그먼트 식별 모형 및 밸브 위치 결정 방법

본 연구에서는 Jun *et al.* (2007a)에서 소개한 알고리즘을 통해 세그먼트를 정의하였다. 세그먼트의 결정에는 Node-Arc, Valve location과 Valve deficiency 총 세 개의 행렬의 구축이 필요하다. 세 개의 행렬은 모두 관의 개수 $\times$ 절점(수용가, 수원, 탱크의 합)의 개수로 형성되며, Node-Arc 행렬은 관이 연결된 절점(관의 양 끝단)을 저장한다. 관이 해당 절점과 연결되어 있을 시 1을 그 외에는 0을 저장한다. Valve location 행렬은 밸브의 위치 정보를 저장하며, Node-Arc 행렬과 마찬가지로 해당 관과 절점 사이에 밸브가 있으면 1을 없으면 0을 저장한다. 마지막으로 Valve deficiency 행렬은 관이 특정 절점과 연결은 되었지만 밸브가 없을 경우 1을 밸브가 있거나 연결이 안 되었을 경우 0을 저장한다. 즉, 1이 저장된 위치가 밸브를 설치해야 하거나 할 수 있는 잠재적 밸브 위치가 된다. 이외의 상세한 세그먼트 결정 방법은 Jun *et al.* (2007a), Choi *et al.* (2018), 그리고 Lim and Kang (2019)에서 확인할 수 있다.

본 연구에서는 밸브의 위치를 결정하기에, Node-Arc 행렬에서 1로 저장된 부분이 밸브가 설치될 수 있는 위치 후보군으로 고려되며, 위치 후보군 내에서 실제 밸브 위치를 최적화 모형으로 결정 후 Valve location 행렬을 구축한다.

### 2.2 수리학적 거리 인자(HGI; Hydraulic Geodesic Index)

본 절에서는 본 연구에서 사용한 수리학적 거리 인자의 정의 및 정량법을 소개한다. 수리학적 거리 인자는 그 모태인 SNSP와 의미 면에서는 동일하며 상세한 SNSP의 배경은 Lee and Jung (2018)에서 확인할 수 있다. 수리학적 거리 인자는 수원에서 각 수용가까지의 연결성(혹은 연결 강도)을 산정하는 정량법으로 해당 값이 커질수록 수원과 수리의 수리학적 거리(Hydraulic Geodesic, HG)가 가까움을 의미한다. 연결성은 수원과 해당 수용가 사이의 예상 에너지 손실로 정의하며, 수리학적 거리는 이러한 에너지 손실을 간접적으로 반영하도록 제안되었고, 수리학적 거리가 짧을수록 연결성은 높고 에너지 손실은 적다. 수리학적 거리 인자는 그래프 이론 인자 중 그래프 내 모든 점 사이의 평균 거리를 산정하는 평균 경로 길이(average path length)와 개념 및 기본 정량화 접근은 유사하나, 모든 점이 아닌 수원과 수용가 사이의 거리만을 구하고 가중 그래프 이론에 기반한 것에서 차이가 있다. 수리학적 거리 인자의 산정에는 아래 Eq. (1)과 같은 가중치가 각 관에 부여된다.

$$w_i = 4.727(\text{norm } C_i)^{-1.852}(\text{norm } D_i)^{-4.871}(\text{norm } L_i) \quad (1)$$

여기서  $w$ 는 가중치,  $\text{norm}$ 은 표준화를 지칭하며,  $C$ 는 관의 조도 계수(roughness coefficient),  $D$ 는 관경,  $L$ 은 관의 길이이며,  $i$ 는 각 관을 의미 한다. 표준화는 관의 재질에 따른 최대 조도계수를 기반으로 하거나, 관망 내의 가장 큰 관경 혹은 관의 길이를 토대로 관별로 진행된다. 예를 들어 관의 최대 조도 계수가 130, 관망 내의 최대 관경이 400 mm, 그리고 관망 내의 최대 길이가 100 m인 경우에, 특정 관의 조도 계수가 100, 관경이 50 mm, 관의 길이가 10 m인 경우 각 표준화 수치는 100/130, 50/400, 10/100으로 산정할 수 있다. Eq. (1)의 형태는 실제 EPANET에서 에너지 손실 산정에 사용하는 저항 계수(resistance coefficient)와 동일하다.

관 별로 가중치를 산정 후, 수원과 수용가의 수리학적 거리를 Dijkstra의 최소거리 알고리즘을 토대로 산정할 수 있다 (Dijkstra, 1959). 앞서 언급했듯, 여기서 말하는 최소거리는 실제 거리와는 다른 것으로 수원에서 각 수용가에 이르기까지 손실되는 최소 에너지 정도(degree)로 해석할 수 있다. 다중 수원의 경우 수리학적 거리가 짧은 수원과의 거리만 해당 수용가의 수리학적 거리로 결정한다. 수리학적 거리 인자는 아래 Eq. (2)와 같이 산정한다.

$$HGI_k = \frac{1}{(HG_k/\min HG)} \quad (2)$$

여기서,  $\min HG$ 는 상수도 관망의 모든 절점의 수리학적 거리 중 가장 짧은 값으로 표준화를 위해 사용된다. 역수를 취한 것은 수원에서 분리된 수용가에서 수리학적 거리가 0으로 산정되어 수원에서 거리가 가까운 것으로 산정되는 것을 방지하기 위함이다. Eq. (2)로 산정된 수리학적 거리 인자의 경우 0과 1 사이의 값을 가지며, 클수록 수원과 강하게 연결되어 있고 에너지 손실이 적음을 의미한다. 참고로 SNSP의 경우 1보다 큰 값을 가질 수 있었으나, 수리학적 거리 인자로의 수정 시 인자의 표준화를 위해 수정되었다. 최종적으로 수리학적 거리 인자들의 평균값을 시스템 수리학적 거리 인자(System hydraulic geodesic index; SHGI)로 정의하며, 아래 Eq. (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$SHGI = \text{Avg}(HGI_k) \quad (3)$$

Lee and Jung (2018)의 연구에서 SNSP가 에너지 효율 및 여러 회복력 인자들과 높은 상관관계를 나타냄을 보인 바 있으며, 다른 그래프 이론의 인자들과도 상수도 관망의 구조적

변형(관의 파손과 같은)이 생길 시 변화하는 경향성이 같음을 검증하였다. 본 연구에서 사용한 SNSP의 수정 버전인 SHGI 또한 동일한 경향성이 있음을 확인하였고, SHGI의 변동에 따른 에너지 효율 및 여러 회복력 인자와 그래프 이론 인자들의 변동을 간접적으로 고려하고자 한다.

### 2.3 수리학적 거리 기반 최적 밸브 위치 결정 모형

밸브의 최적 위치 선정 시 밸브 개수 최소화, 격리 시 최대 물 부족분 최소화(신뢰성), 그리고 최소 SHGI 최대화 총 3가지를 고려하여 진행하였다. 밸브 개수는 비용을 고려하는 방법으로 적은 개수로 최대의 효율을 내기 위해서 고려해 주었으며, 격리 시 최대 물 부족분 최소화는 격리로 인한 단수 피해를 최소화하기 위한 목적으로 고려하였다. 최대 물 부족분은 신뢰성으로 고려해 주었고, 신뢰성은 총 요구 수요량 대비 전달된 수요량으로 산정한다. 수리해석은 수리해석 프로그램인 EPANET을 사용하여 진행하였다. 본 연구에서 사용한 EPANET 모형은 세그먼트 격리 시 발생할 수 있는 비정상 상황에서 모의를 위해 소스 코드가 압력 기반 해석으로 수정된 모형을 사용하였다(Judi and McPherson, 2015). 마지막으로 최소 SHGI 최대화는 격리 시에 수원과의 연결성을 극대화하기 위해 고려되었다. SHGI는 Python 언어를 통해 구축한 모형을 기반으로 상수도관망의 기본 정보(관의 길이, 관경)만 가지고 산정하였다. Dijkstra의 최소 거리 알고리즘은 Python 프로그램 내 SciPy 패키지를 통해 산정할 수 있다(Jones et al., 2014).

본 연구에서는 시나리오의 중요도도 높아 3가지 고려사항을 동등한 가중치를 주고 단일 목적 함수의 형태로 고려해 주었으나 향후 연구에서는 다목적함수로 고려해 주어야 한다. 본 연구에서 사용한 목적 함수는 아래 Eq. (4)와 같다.

$$\text{maximize } F = [\min(SHGI_i) \times \min(Rel_i) / \text{Valve}]^{1/3} \quad (4)$$

여기서,  $\min()$ 은 최소 값을 의미하며,  $Rel$ 은 신뢰성,  $Valve$ 는 밸브의 개수를 의미한다. 또한 SHGI와  $Rel$ 의  $i$ 는 0에서 세그먼트의 총 개수까지의 숫자로, 각 세그먼트 격리 시 산정된 SHGI와 신뢰성을 의미한다. 즉, 밸브의 개수를 줄이며 결정된 밸브의 위치에서 세그먼트 격리 별로 산정된 SHGI와 신뢰성 중 최소치를 최대화하는 것이 목적함수의 목표이다. 본 연구에서는 압력 기반 해석으로 수리해석을 진행하기에 별도의 압력 제약 조건을 고려하지는 않았다.

본 연구에서 사용한 최적화 모형은 ReHS로 이는 기존 확률 탐색법의 탐색 속도 향상을 위해 매개변수의 적용을 수정한

모형이다. 매개변수는 기존 화음탐색법과 달리 고정된 값을 가지지 않고 최적화가 진행됨에 따라 조정된다. 자세한 최적화 모형에 대한 소개는 Lee *et al.* (2018)에서 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 HMCR는 0.9에서 0.8로 PAR의 경우 0.1에서 0.2로 변경되며, HM (Harmony Memory)는 30, 총 시산 횟수는 10,000번으로 설정했다.

### 3. 연구 대상 네트워크

본 연구에서 적용한 관망은 페스카라 관망으로 Bragalli *et al.* (2012)에서 처음 소개되었다(Fig. 1). 해당 관망은 다중 수원으로 총 세 개의 수원이 자연 유하식으로 물을 공급한다. 관은 총 99개로 100 mm에서 400 mm 사이의 관경을 가지며, 길이는 최대 2,310 m에서 최소 3.6 m이다. 관의 조도 계수는 모두 130으로 동일하다. 관망 내 수용가는 총 71개로 총 요구 수량은 498.23 LPS (Liter per second)이다. 최소 수압 조건은 15 m로 모든 수용가에 동일하게 적용된다. 최적 설계 전 기존 밸브 위치는 Choi *et al.* (2018)에서 제공한 정보로 가정하였다.

본 연구에서는 기후 변화와 같은 교란으로 인해 발생할 수 있는 가뭄 시 수원에서의 물 부족을 모의하기 위해 페스카라

관망의 총 세 개 수원의 수두를 조정하였다. 수원 수두 조건 시나리오는 총 두 가지로, 기존 수두 유지하여 모의하는 Scenario A와 모든 수원의 수두를 동일하게 10% 감소하여 모의하는 Scenario B로 설정하였다. 수원의 수두 조건은 Table 1에 나타난 것과 같다. 각 수원의 수두 조건 시나리오는 독립적으로 적용, 최적 밸브의 수와 위치를 결정하였다.

### 4. 적용 결과

최적화 진행 중 각 밸브 위치 후보군이 결정되면 결정된 밸브 위치에 따른 세그먼트를 파악한 후 각 세그먼트 격리 시 SHGI와 신뢰성을 독립적으로 산정한다. 결정된 밸브의 개수와 계산된 각 인자를 기반으로 Eq. (4)를 계산 후 그 값이 가장 작은 밸브의 위치를 최적 위치로 결정하며 기존 밸브의 위치와 각 수원의 수두 조건 시나리오별 최적 밸브 위치 설계안 (Solution으로 정의)별 결과가 Table 2에 요약되어 있다.

먼저 밸브 최적 위치 결정 전 페스카라 관망(Table 2의 Original)은 총 67개의 밸브가 설치되어 있으며 이를 통해 관망을 총 34개의 세그먼트로 분할 할 수 있었다. 관망을 세그먼트별로 분할 시 최소 SHGI는 0.00727과 최소 신뢰성은

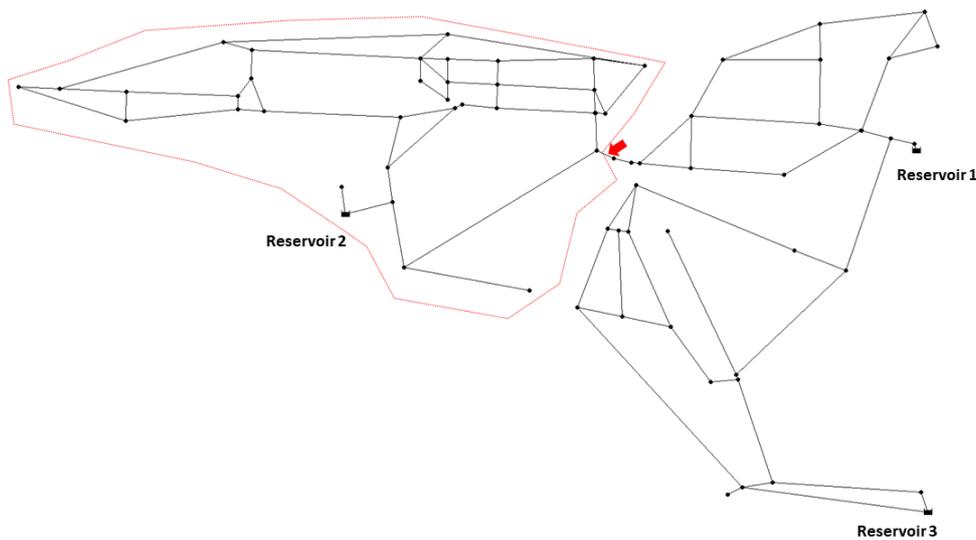


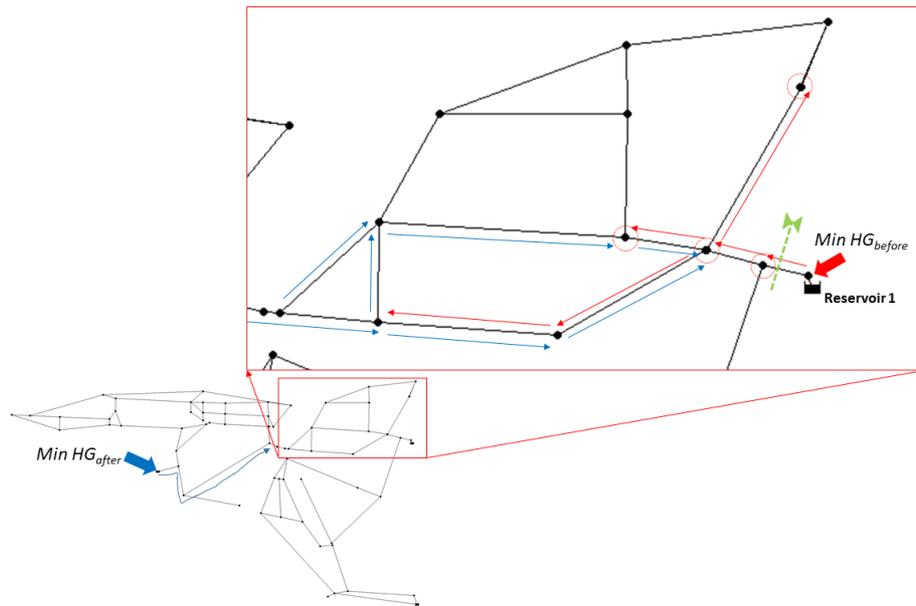
Fig. 1. A schematic of Pescara Network showing the area with a half of total system demands and the only connection pipe to other network segments

Table 1. Total head (in meter) of three reservoirs considered in Scenario A and B

	Reservoir 1	Reservoir 2	Reservoir 3
Scenario A	57.00	53.08	55.00
Scenario B	51.30	47.77	49.50

**Table 2.** Summary of the number of segments and valves and minimum SHGI and reliability results of the original and optimal solutions in the Pescara network

	# of Segment	# of Valve	Min SHGI	Min Rel
Original	38	67	0.00727	0.55086
Solution A (obtained under Scenario A)	26	48	0.00892	0.55086
Solution B (obtained under Scenario B)	32	55	0.00892	0.54369



**Fig. 2.** An illustration of demand nodes sharing the common Min HG pathways for their HG calculation

0.55086으로 나타났다. 참고로 격리 전 SHGI는 0.02876으로 모든 시나리오에서 동일하며 신뢰성은 1로 큰 문제 없이 모든 수용가에 물을 공급하고 있었다. 즉, 페스카라 관망의 기존 밸브 위치에서 세그먼트 분할 시 SHGI는 최대 75%가량 그리고 신뢰성은 최대 45% 정도 감소함을 보였다.

Scenario A 조건에서의 밸브 최적 위치 결과(Solution A)는 기존 67개의 밸브보다 적은 48개의 밸브를 결정하였으며, 세그먼트 또한 총 26개로 줄어든 것을 확인하였다. 감소한 밸브 개수와 세그먼트로도 최소 신뢰성은 동일한 것으로 나타났으며, 최소 SHGI의 경우 오히려 향상된 값(격리 전 SHGI 대비 약 70% 감소)을 보였다. 즉 페스카라 관망의 경우 불필요하게 많은 밸브가 설치되어 있으며 최적 설계된 밸브 위치로 총 19개의 밸브를 줄여도 향상된 상수도 관망의 성능을 유지할 수 있을 것으로 보인다. 참고로 각 세그먼트 격리 시 산정된 SHGI와 신뢰성 간의 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient)는 대략 0.675 정도로 낮은 편은 아니지만, 가장 낮은 SHGI를 나타내는 세그먼트와 가장 낮은 신뢰성을 나타내는 세그먼트는 동일하지 않다. 이는 두 인자의 고려 사항이 다르기 때문으

로, SHGI의 경우 관의 값에 가중치를 두고 유량과는 무관하게 산정되지만, 신뢰성은 전적으로 유량으로 산정된다. 다만, 최소 수리학적 거리(Eq. (2)에서 min HG)인 수용가가 격리되는 경우를 제외하면 피어슨 상관관계는 0.858로 증가한다.

기존 페스카라 관망의 밸브 위치와 Solution A의 밸브 위치에서 모두 2번 수원(Fig.1에서 좌측에 위치한 Reservoir 2)이 격리될 경우에 가장 낮은 신뢰성이 산정되었다. Fig. 1에서 좌측 상단(점선 박스 내)에 위치한 수용가의 수요량은 248.64 LPS로 상수도 관망의 총 수요량의 절반 정도이다. 이 구역에 위치한 수용가들은 2번 수원이 격리되면 Fig. 1의 화살표로 표시된 관이 유일하게 좌측 상단으로 물을 공급할 수 있는 관이 된다. 이로 인해 압력 저감이 불가피하고, 압력 기반 해석 시 전달 가능한 물의 양이 감소하게 된다. 이러한 이유로 2번 수원이 격리될 때 가장 낮은 신뢰성이 계산되었다. 결과를 미루어 볼 때, 페스카라 관망에서 절반 이상의 수요량이 할당된 좌측 상단 지역에 탱크와 같은 물 저장 시설을 설치한다면 2번 수원을 포함한 세그먼트 격리로 인한 신뢰성의 피해를 어느 정도 저감할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 주요 구역 사이를 연결하

는 관을 비상 라인(Emergency Connection)으로 간주, 병렬 관 설치를 한다면 전체 시스템의 물 공급 여분력을 확보해줄 수 있다.

최소 SHGI는 1번 수원(Fig.1 에서 우측 상단에 위치한 Reservoir 1)이 격리될 경우 가장 낮은 값을 나타냈다. 1번 수원 격리 전, 1번 수원에 가장 근접한 수용가가 최소 수리학적 거리(설명을 위해  $\min HG_{\text{before}}$ 로 정의) 지점이었다. 그러나 1번 수원 격리 후 최소 수리학적 거리(설명을 위해  $\min HG_{\text{after}}$ 로 정의)는 2번 수원에 근접한 수용가로 변경되며 이 거리는 기존보다 길어진다. Fig. 2를 보면, 기존  $\min HG_{\text{before}}$ 를 공유하던 수용가들(Fig. 2에서 붉은색 동그라미로 표시된 수용가들)의 수리학적 거리는 붉은 화살표로 이어진 관들의 가중치(Eq. (1)) 합으로 산정되었다. 그러나  $\min HG_{\text{after}}$ 로 최소 수리학적 거리가 변경되면, 동일한 수용가들의 수리학적 거리는 푸른 화살표로 이어진 관들의 가중치 합으로 수정된다. 이처럼 1번 수원이 격리될 경우 기존에  $\min HG_{\text{before}}$ 를 공유하던 수용가들의 수리학적 거리가 길어지게 된다. 이는 결국 Eq. (2)에 따라 수리학적 거리 인자의 감소로 이뤄진다. 낮은 SHGI는 Lee and Jung (2018)에서 증명하였듯, 낮은 에너지 효율과 회복력으로 연결되어,  $\min HG_{\text{before}}$ 를 포함한 세그먼트의 격리는 격리 기간 중 에너지 효율 측면과 회복력 측면에서 피해를 많이 받는다고 할 수 있다. 즉, SHGI의 측면에서 해당 세그먼트는 병렬 관 혹은 우회 관을 설치하여 격리 중에도 물을 공급할 수 있어야 하며, 지속적이고 철저한 점검으로 최대한 피해를 줄일 수 있도록 해야 할 것으로 보인다.

앞서 언급한 것과 같이, 본 연구에서는 기존의 연구와는 달리 비정상상태에서의 수리 해석을 위해 유량 기반 해석 대신 압력 기반 해석 버전의 EPANET을 기반으로 수리 해석을 진행하였다. Table 3은 유량 기반 해석과 압력 기반 해석에서 물 공급 부족분 결과를 요약한다. Table 3에 요약했듯, 유량 기반 해석 기반의 수리해석으로는 격리 지역 외의 다른 부분에서 압력 저감으로 인한 수요량 변동을 예측하지 못하여 실제보다 낮은 피해량이 산정되었다. 특히 20번 세그먼트의 경우 2번 수원의 격리를 포함하는데, 이때 격리로 인해 분리되는 수용가는 하나밖에 없어 25 LPS의 피해가 예상되지만, 압력 기반 해석 결과 앞서 서술한 내용과 같이 수압의 변동 때문에 10배에 가까운 피해량이 산정되는 것으로 나타났다. 이외에도 8, 9, 11, 18번 세그먼트의 격리가 두 해석 방법에서 큰 차이를 나타내는 것으로 확인되었다. 참고로 해당 피해량은 시간당 물 공급 부족분(LPS)이기에, 작은 차이라도 격리된 시간이 길어질수록 더 큰 피해가 발생할 수 있다. 본 결과로부터, 밸브 위치 선정 및 세그먼트 관련 분석 시 반드시 압력 기반 해석이 수반되어야 함을 확인하였다.

Solution B의 경우도 기존 페스카라 관망보다는 향상된 성능을 보여준다. Solution A와 비교 시 수원의 수두 저감 탓에 전반적으로 수용가에서 압력이 감소하여 미세하지만 낮은 신뢰성이 계산되었다. 다만 밸브의 수가 7개 정도 많이 들어가기에, 밸브의 비용을 고려할 경우 Solution A가 Solution B보다 비용 효율적인 밸브 설계안이라고 할 수 있다(Table 2). 바꾸어 말하면, Solution B와 같이 수원의 수두가 낮아질 경우 기존의 수원 수두 조건(Scenario A)에서와 유사한 성능을 하려면 좀 더 큰 비용(혹은 많은 수의 밸브)을 투자해야 한다고 해석할 수 있다. 참고로 두 밸브 설계안의 상수도 관망에 아무런 격리가 없으면 압력을 비교해 보면 모든 수용가 통틀어 평균적으로

**Table 3.** Summary of total unmet demand calculated under the isolation of each segment with demand driven analysis (DDA) and pressure driven analysis (PDA)

Segment	DDA (LPS)	PDA (LPS)	Percentage Difference (%)
0	0	0	100
1	0	0	100
2	0	0	100
3	0	0	100
4	0	0	100
5	0.01	0.01	100
6	1.68	1.68	100
7	3.09	3.09	100
8	4.57	199.22	4359
9	6.06	127.28	2100
10	6.46	6.46	100
11	6.55	121.70	1858
12	7.44	35.02	471
13	12.12	12.12	100
14	12.64	18.62	147
15	16.40	16.40	100
16	17.10	17.10	100
17	19.20	31.65	165
18	19.30	147.93	766
19	24.38	24.38	100
20	25	223.80	895
21	25.00	25.00	100
22	29.77	46.17	155
23	52.51	65.65	125
24	68.23	74.14	109
25	79.13	96.78	122
26	86.64	90.27	104

5.5 m의 차이가 나타났다. 두 관망은 서로 다른 수원의 수두 조건에서 최적화를 진행했지만, 같은 세그먼트의 구성을 나타내기도 했다(Fig. 3). 이러한 세그먼트들은 수원의 수두 조건과는 독립적으로 중요한 세그먼트로 정의할 수 있다.

마지막으로 두 밸브 설계안의 동일한 조건 하 비교를 위해 각 밸브 설계안을 수원의 수두 조건 시나리오에 교차 적용(예, Solution B에 Scenario A를 적용)하였고 그 결과가 Table 4에 정리되어 있다. SHGI는 밸브 설계안에 대해서는 변하지만, 수두 조건 시나리오에 따라 변하지 않음으로 비교 대상으로 고려하지 않았으며, 신뢰성 결과만 비교하였다. 비교 분석 결과 각 최소 신뢰성의 경우 두 밸브 설계안 모두에서 2번 수원이 격리된 경우에 발생하였으며, Fig. 3에 확인한 것과 같이 두 밸브 설계안에서 동일하기에 추가로 신뢰성의 평균 신뢰성과 신뢰성의 표준편차 또한 비교에 사용하였다. 동일한 설계안에서 다른 수원 수두 조건 시나리오의 비교 시에도 Scenario A가 최소 신뢰성은 물론 평균 신뢰성과 신뢰성의 표준편차에서도 조금 더 안정적인 값을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 동일한 수원 수두 조건 시나리오에서 다른 설계안을 비교해보면, Solution B의 경우 앞서 확인했던 것과 같이 더 많은 수의 밸브가 있어야 평균 신뢰성 및 신뢰성의 표준편차를 안정적으로 유지할 수 있음을 알 수 있다. 결국은 적용하는 시

나리오에 따라 다른 설계가 필요하고 다양한 시나리오를 고려하지 않을 경우 효과적인 밸브의 위치를 결정하기에 어려움이 있을 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 시나리오에 기반한 밸브 최적 위치를 결정 방법론을 소개하였다. 소개한 방법론은 밸브의 개수, 격리 시 물 부족분, 그리고 SHGI에 동등한 가중치를 부여하여 단일 목적함수로 만든 후 최적화를 진행하였다. 제안한 방법론을 페스카라 관망에 적용하였으며, 총 두 가지 수원 수두 조건 시나리오를 고려하여 시나리오별 밸브 설계의 차이점을 알아보았다. 또한, 유량 기반 해석의 비정상 상태에서의 적용 한계를 해결하기 위해 압력 기반 해석으로 확장된 EPANET을 사용하여 세그먼트 격리 시 의도치 않은 압력 저감으로 발생 가능한 물 부족분에 대해 분석 하였다.

분석 결과 기존 페스카라 관망에 설치된 밸브는 과대 설계가 되어 있음을 보여주었으며, 총 19개의 밸브를 줄이더라도 유사한 상수도 관망 성능을 유지 할 수 있을 것으로 결론 내려졌다. 세그먼트 격리 시에 SHGI와 신뢰성의 변화는 상관관계

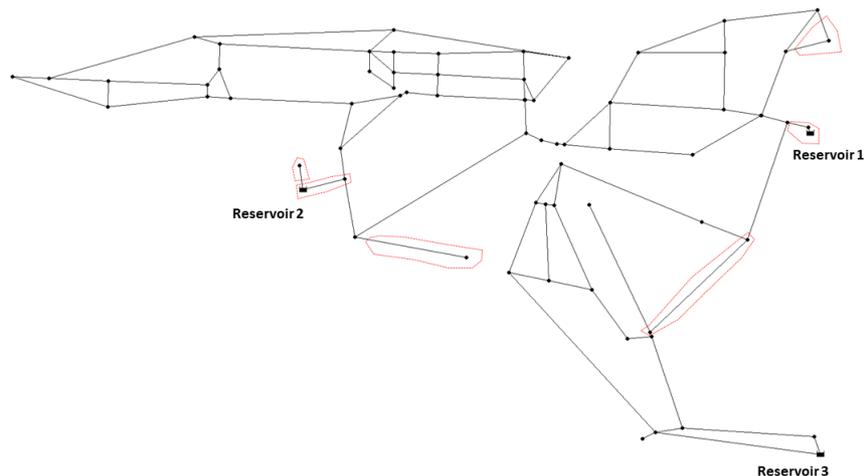


Fig. 3. Common segment locations of Solution A and B (obtained under Scenario A and B in Table 1, respectively)

Table 4. Summary of reliability results of Solution A and B

Solution	Solution A		Solution B	
	Scenario A	Scenario B	Scenario A	Scenario B
Min	0.5509	0.5437	0.5509	0.5437
Average	0.8971	0.8938	0.9052	0.9020
Standard Deviation	0.1256	0.1286	0.1242	0.1270

가 적은 편은 아니지만, 최소 SHGI와 신뢰성을 나타내는 세그먼트는 다르게 나타났다. 밸브 설계 시 수요량이 많은 지역으로 물을 공급하는 수원의 격리가 상수도 관망의 신뢰성에 피해를 가장 많이 주었고, SHGI의 측면에서는 최소 수리학적 거리인 수용가가 포함된 세그먼트의 격리 시 가장 많은 SHGI 피해가 발생했다. 이에 따라 수요량이 많은 지역은 탱크와 같은 저장 시설이, 최소 수리학적 거리가 포함된 세그먼트는 dual-lining 혹은 우회 관을 연결하여 물 공급을 지속하는 것을 권장한다. 유량 기반 해석 결과와 압력 기반 해석 결과 비교 결과, 유량 기반 해석 기반의 수리해석으로는 격리 지역 외의 다른 부분에서 압력 저감으로 인한 수요량 변동을 예측하지 못하여 피해량을 과소 예측할 수 있음을 밝혔다. 시나리오 A와 B의 비교에서는 수원의 수두가 낮아진 Scenario B의 경우 Scenario A와 유사한 성능을 나타내려면 보다 많은 수의 밸브가 설치되어야 함을 보였다. 결국은 적용하는 수원 수두 조건 시나리오에 따라 다른 설계안이 필요하기에 다양한 시나리오를 고려해서 전반적으로 상수도 관망의 성능을 극대화할 수 있도록 밸브의 위치를 정해줘야 할 것이다.

본 연구는 밸브의 최적 위치 결정에 있어서 SHGI와 시나리오의 사용을 소개한 것에 의미가 있으며 향후 다음과 같은 방향으로 적용 및 확장할 수 있다. 먼저, 본 연구에서 단일 목적함수로 진행한 최적화를 다목적 최적 설계로 수정할 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서 적용한 것과 같이 수원의 수두를 조절하는 것 외에도 Lee *et al.* (2018)과 Oak *et al.* (2018)에서 제안한 압력 기반 해석 방법과 같이 수원을 유한 수원으로 고려하여 수리해석을 진행할 수 있을 것이다. 그리고 좀 더 세분화되고 다양한 시나리오와 시나리오별 확률을 고려해서 밸브 위치 결정의 강건성 기반 설계 방향으로 확장이 가능할 것이다. 마지막으로 시나리오 플래닝과 같이 순차적으로 밸브를 설계하는 계획을 수립할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업의 연구비 지원(2019-MOIS31-010)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Alvisi, S., Creaco, E., and Franchini, M. (2011). "Segment identification in water distribution systems." *Urban Water Journal*, Vol. 8, No. 4, pp. 203-217.
- Araujo, L., Ramos, H., and Coelho, S. (2006). "Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management." *Water Resources Management*, Vol. 20, No. 1, pp. 133-149.
- Bragalli, C., D'Ambrosio, C., Lee, J., Lodi, A., and Toth, P. (2012). "On the optimal design of water distribution networks: A practical MINLP approach." *Optimization and Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 219-246.
- Choi, Y., Jung, D., Jun, H., and Kim, J. (2018). "Improving water distribution systems robustness through optimal valve installation." *Water*, Vol. 10, No. 9, p. 1223.
- Creaco, E., Franchini, M., and Alvisi, S. (2010). "Optimal placement of isolation valves in water distribution systems based on valve cost and weighted average demand shortfall." *Water Resources Management*, Vol. 24, No. 15, pp. 4317-4338.
- Creaco, E., Franchini, M., and Alvisi, S. (2012). "Evaluating water demand shortfalls in segment analysis." *Water Resources Management*, Vol. 26, No. 8, pp. 2301-2321.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V. G., and Alcocer-Yamanaka, V. H. (2013). "Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 5, pp. 620-629.
- Dijkstra, E. (1959). "A note on two problems in connexion with graphs (PDF)." *Numerische Mathematik*. Vol. 1, No. 1, pp. 269-271. doi:10.1007/BF01386390.
- Giustolisi, O., and Savic, D. (2010). "Identification of segments and optimal isolation valve system design in water distribution networks." *Urban Water Journal*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-15.
- Herrera, M., Abraham, E., and Stoianov, I. (2016). "A graph-theoretic framework for assessing the resilience of sectorised water distribution networks." *Water Resources Management*, Vol. 30, No. 5, pp. 1685-1699.
- Jones, E., Travis O., and Peterson, P. (2014). *{SciPy}: open source scientific tools for {Python}*.
- Jowitt, P., and Xu, C. (1990). "Optimal valve control in water-distribution networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No. 4, pp. 455-472.
- Judi, D., and McPherson, T. (2015). *Development of extended period pressure-dependent demand water distribution models*. Los Alamos National Lab. (LANL), Los Alamos, NM (United States).
- Jun, H. (2005). "Isolating subsystems by valves in a water distribution system and evaluating the system performance." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 7, pp. 585-593.
- Jun, H. (2006). "An evaluation of the pipe failure impact in a water distribution system considering subsystem isolation." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 2, pp. 89-98.
- Jun, H., and Loganathan, G. V. (2007). "Valve-controlled segments in water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 133, No. 2, pp. 145-155.
- Jun, H., Loganathan, G. V., Deb, A., and Grayman, W. (2007a) "Valve distribution and impact analysis in water distribution systems." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 133, No. 8, pp. 790-799.

- Jun, H., Park, J., Baek, C., and Kim, J. (2007b). "A segment-based minimum cutset method for estimating the reliability of water distribution systems." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 9, pp. 735-742.
- Kang, D., and Lansey, K. (2009). "Real-time optimal valve operation and booster disinfection for water quality in water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 136, No. 4, pp. 463-473.
- Kim, J., and Jun, H. (2013). "An exploratory development of a mathematical programming model for planning of restricted water supply." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 4, pp. 131-136.
- Lee, H., Jun, H., Baek, S., and Kim, J. (2018). "Development and application of advanced-pressure driven analysis model considering limited reservoir." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 2, pp. 271-280.
- Lee, S., and Jung, D. (2018). "Correlation analysis between energy indices and source-to-node shortest pathway of water distribution network." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 11, pp. 989-998.
- Lee, S., Oak, S., Jung, D., and Jun, H. (2019). "Development of Failure Cause-Impact-Duration (CID) plots for water supply and distribution system management." *Water*, Vol. 11, No. 8, p. 1719.
- Lee, S., Yoo, D. G., Jung, D., and Kim, J. H. (2018). "Application of life cycle energy analysis for designing a water distribution network." *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 23, No. 6, pp. 1174-1191.
- Lim, G., and Kang, D. (2019). "Optimal placement of isolation valves in water distribution networks based on segment analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 52, No. 4, pp. 291-300.
- Ministry of Environment (2010). *Water distribution system standards*.
- Oak, S., Baek, S., Lee, H., and Jun, H. (2018). "An application of the A-PDA model for the interconnected operation among adjacent blocks of water distribution systems in case of emergency." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 2, pp. 231-237.
- Rana, S., and Boccelli, D. (2016). "Contaminant spread forecasting and confirmatory sampling location identification in a water-distribution system." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 142, No. 12, p. 04016059.
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2: users manual*.
- Shin, S., Lee, S., Judi, D., Parvania, M., Goharian, E., McPherson, T., and Burian, S. (2018). "A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems." *Water*, Vol. 10, No. 2, pp. 164-189.
- Yazdani, A., and Jeffrey, P. (2011). "Applying network theory to quantify the redundancy and structural robustness of water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 138, No. 2, pp. 153-161.