



# A new approach to design isolation valve system to prevent unexpected water quality failures

Park, Kyeongjin<sup>a</sup> · Shin, Geumchae<sup>b</sup> · Lee, Seungyub<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Undergraduate Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, Korea

<sup>b</sup>Undergraduate Researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, Korea

<sup>c</sup>Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, Korea

Paper number: 22-068

Received: 2 September 2022; Revised: 29 September 2022; Accepted: 5 October 2022

## Abstract

Abnormal condition inevitably occurs during operation of water distribution system (WDS) and requires the isolation of certain areas using isolation valves. In general, the determination of the optimal location of isolation valves considered minimization of hydraulic failures as isolation of certain areas causes a change in hydraulic states (e.g., flow direction, velocity, pressure, etc.). Water quality failure can also be induced by changes in hydraulics, which have not been considered for isolation valve system design. Therefore, this study proposes a new isolation valve system design methodology to prevent unexpected water quality failure events. The new methodology considers flow direction change ratio (FDCR), which accounts for flow direction changes after isolation of the area, as a constraint while reliability is used as the objective function. The optimal design model has been applied to a synthetic grid network and the results are compared with the traditional design approach. Results show that considering FDCR can eliminate flow direction changes while average pressure and coefficient of variation of pressure, velocity, and hydraulic geodesic index (HGI) outperform compared to the traditional design approach. The proposed methodology is expected to be a useful approach to minimizing unexpected consequences by traditional design approaches.

**Keywords:** Isolation valves, Water distribution system, Water quality failure, Graph theory, Optimization

## 수질사고 예방형 상수도 관망 밸브 시스템 설계

박경진<sup>a</sup> · 신금채<sup>b</sup> · 이승엽<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>한남대학교 공과대학 토목환경공학과 학부연구생, <sup>b</sup>한남대학교 공과대학 토목환경공학과 학부연구생, <sup>c</sup>한남대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수

## 요 지

상수도 관망 운영 단계에서 비정상상황은 필연적으로 발생하며, 이때 밸브를 이용한 구역의 격리가 필요하다. 밸브를 이용한 구역 격리 시 흐름 경로와 유향, 유속의 변화와 같은 수리적 변화로 인해 수리적 피해는 불가피하며, 대부분의 기존 연구들은 수리적 피해를 최소화할 수 있도록 밸브의 위치를 결정하여 왔다. 다만, 수리적 변화는 예지치 못한 수질 사고를 유발할 수 있기에, 격리 시 수질 사고 발생 여부를 미리 판단할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 밸브 위치에 따른 예지치 못한 수질 문제를 예방할 수 있는 밸브 설계 방안을 제안한다. 이를 위한 격리 전후의 관로별 흐름 특성 변화율을 정량화하는 유향 변경률 인자(Flow Direction Change Ratio, FDCR)와 신뢰도(reliability)를 고려한 최적 설계 방법론을 제안하였으며, 해당 모형을 가상 상수도 관망에 적용하여 FDCR 고려 유무에 따른 설계안을 비교하였다. 설계 결과 FDCR을 고려한 경우 기존 설계안 대비 유향 변동이 없는 것을 확인하였으며, 세그먼트 격리에 따른 절점별 압력과 관별 유속의 평균과 변동성을 확인한 결과 기존 설계안 대비 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다. 또한 설계안 비교를 위해 그래프 이론 기반 인자인 수리학적 거리 인자(Hydraulic Geodesic Index, HGI)를 활용하였으며, HGI가 높은 설계안 이 유향 변동성이 낮은 것으로 나타났다. 본 연구는 향후 수질 사고를 고려한 밸브 시스템의 설계 및 운영에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

**핵심용어:** 계수밸브, 상수도 관망, 수질 사고, 그래프이론, 최적화

\*Corresponding Author. Tel: +82-42-629-8042  
E-mail: seungyub.lee@hnu.kr (Lee, Seungyub)

## 1. 서론

상수도 관망은 다양한 수원으로부터 취수된 물을 각 수용가에 적정 수압과 수질을 유지하며 전달하는 역할을 한다. 상수도 관망의 기능을 유지하는 것은 중요한 일이지만, 관의 노후나 자연재해로 인해 구성요소가 파손되어 제 기능을 유지하지 못하는 비정상상황이 야기되기도 한다(Shin *et al.*, 2018). 이러한 비정상상황 발생 시, 밸브를 통해 해당 구역을 격리하고 비정상상황 유형에 따라 대처하게 된다. 다만, 밸브의 차폐는 결국에는 상수도 관망의 형상(layout)을 바꾸게 되고(Lee and Jung, 2021a), 이로 인해 불가피하게 상수도 관망 관내 흐름 상태(유향 및 유속)가 변하게 된다(Brentan *et al.*, 2021). 이러한 관내 흐름 변화는 일차적으로 단수와 수압 저감으로 이어지기도 하지만, 이차적으로 예기치 못한 수질 사고의 발생 원인이 되기도 한다(Van Den Boomen *et al.*, 2004; Vreeburg *et al.*, 2009). 2019년 국내에서 발생한 일련의 수질사고들의 직접적인 원인은 밸브 차폐는 아니었지만, 밸브 차폐로 인한 영향과 유사한 관내 흐름 상태 변화가 주 원인으로 알려진 바 있다(Hong *et al.*, 2020).

앞서 언급한 것과 같이 상수도 관망의 밸브는 비정상상황에서 복구가 필요한 구역에 대한 단수를 유도하는 중요한 구성요소이며, 일반적으로 밸브 차폐를 통해 격리될 수 있는 최소 구역을 세그먼트(segment)로 정의한다(Walski, 1994). 세그먼트는 밸브의 위치에 따라 정의되며, 세그먼트 격리 시 수리적 특성(수압 및 유량) 변화 혹은 피해 범위와 정도가 밸브의 위치에 따라 상이하다고 할 수 있다. 이러한 수리적 특성 변화 및 피해 범위와 정도는 실제 관망에서 밸브의 격리를 통해 할 수 있는 실험이 아니기에 관망해석 모형을 활용하여 피해 정도를 추정해야 한다. 이에 따라 밸브의 위치 선정에 있어 세그먼트를 구분하는 방법론과 이를 관망해석 모형에 반영하여 피해 구역 및 정도를 산정하는 것은 비정상상황으로 인한 피해를 저감하기 위해 필수적인 절차라 할 수 있다. 세그먼트를 효율적으로 파악하기 위한 방법론은 Walski (1994)와 Jun and Loganathan (2007)을 비롯한 다양한 연구에서 제안된 바 있다(Alvisi *et al.*, 2011; Giustolisi and Savic, 2010; Kao and Li, 2007).

이러한 방법론을 토대로 후속연구에서는 밸브 차폐에 따른 영향을 신뢰도(reliability)(Gupta *et al.*, 2014; Shuang *et al.*, 2017; Giustolisi, 2019), 취약성(vulnerability)(Berardi *et al.*, 2014), 강건성(robustness)(Hernandez and Ormsbee, 2018), 복원력(resilience)(Hernandez and Ormsbee, 2022; Meng *et al.*, 2018) 등을 통해 고려하였다. 또한, 최근에는 Yang *et al.* (2022)과 Lee and Jung (2021a)의 연구에서 기설치된 밸브 시

스템에 밸브를 추가하거나 제거 혹은 단계별로 밸브를 설치하는 방법론도 제안된 바 있다. 현재까지 확인된 연구에서는 밸브의 차폐에 따른 수질 사고의 가능성을 언급은 하고 있지만, 실질적인 수질 사고를 고려한 밸브 설계는 없는 것으로 조사되었다. 밸브의 설계와는 달리 운영 측면에서는 수질 영향을 고려한 사례가 있었으며, Kang and Lansley (2009)의 연구에서는 재염소 시설과 밸브 운영을 통해 염소 농도를 조정한 바 있으며, Brentan *et al.* (2021)는 누수와 압력관리를 위한 밸브 운영 시 흐름경로와 체류시간이 달라짐을 언급하며 두 가지 목적 함수를 동시에 고려한 밸브 운영이 필요함을 보인 바 있다. Dias *et al.* (2017)의 경우 DMA (Districted Metered Area) 구성 방법에 따라 특정 구역에서 길어진 체류시간에 의해 수질이 저감함을 확인한 바 있다. 이와 같이 밸브의 위치에 따른 수질 및 흐름 특성의 변화는 이미 알려져 있지만, 밸브의 설계 단계에서는 고려된 바 없다.

여러 연구들에서 언급되었듯 일반적으로 밸브 차폐로 인한 수리적 특성 변화로 인해 발생할 수 있는 일반적인 수질 문제는 염소 농도 저감과 탁수 문제이다(Dias *et al.*, 2017; Kang and Lansley, 2009; Vreeburg *et al.*, 2009). 염소 농도의 경우 길어진 체류시간으로 인한 영향으로 볼 수 있으며 기존 흐름 경로와 달라지는 경우 차폐 전에 비해 농도가 낮아질 가능성이 높다. 탁수의 경우 여러 형태에서 발생할 수 있지만, 주로 관내 흐름 변화로 인해 발생하는 것으로 알려져 있다(Boxall and Saul, 2005; Husband and Boxall, 2016). 유속과 관련해서는 평상시 유속이 느린 관에서 특정 속도 이상의 유속이 발생할 경우에 해당하며, 유향과 관련해서는 평상시 유향 변동이 없는 관에서 역방향 흐름이 생기는 경우에 해당한다. 이러한 특성은 관 세척(flushing)에 활용되기도 하며, 이때 특정 유속 이상을 발생시켜 세척하거나 역방향 흐름을 이용하여 세척을 유도하는 방식이 일반적이다(Kim *et al.*, 2015; Poulin *et al.*, 2010; Sass Braga *et al.*, 2020). 또한, 세척을 위한 한계유속을 하루에 한 번 이상 발생시키는 관망을 설계한 사례들도 있으며 해당 유속을 자가세척 유속이라 정의하였다(Van Den Boomen *et al.*, 2004). 대표적인 연구가 Vreeburg *et al.* (2009)와 Abraham *et al.* (2018)의 사례로, Vreeburg *et al.* (2009)의 경우 네트워크의 형상(layout)을 Abraham *et al.* (2018)의 경우 밸브 차폐를 통해 관망의 형태를 바꾸어 자가세척 유속을 확보하는 방법론을 제안하였다. 다만, 평상시 자가세척 유속을 확보하지 못한 관로의 경우 밸브 차폐로 인해 비의도적인 탁수를 유발할 가능성이 있기에, 밸브 시스템의 설계에 있어 수리적 특성은 고려되어야 할 필요가 있다(Armand *et al.*, 2015).

이에, 본 연구에서는 상수도 관망의 밸브 시스템 설계 시 격

리에 따른 관내 흐름 변화를 고려할 수 있는 유향 변경을 인자 (Flow Direction Change Ratio, FDCR)를 고려하여 격리 시 비의도적인 수질 사고를 예방하고자 한다. 이를 위해 기존 설계 법에서 가장 많이 고려되었던 신뢰도를 목적함수로하고 본 연구에서 제안하는 FDCR를 제약조건으로 고려하는 최적 설계 모형을 구축하였다. 최적화 기법은 유전알고리즘(Genetic Algorithm)(Goldberg et al., 1989)을 적용하였다. 신뢰도와 유향을 결정하기 위해 압력기반 해석(Pressure Driven Analysis) 알고리즘을 탑재한 EPANET 모형(Judi and McPherson, 2015)을 사용하였다. 제안한 모형은 6 × 6 그리드 관망에 적용하였으며, 비용에 대한 편차를 제외하기 위해 밸브의 개수는 전체 밸브 설치 가능한 개수 대비 30~70%로 제한하여 최적 설계를 진행하였다. 기존 신뢰도 기반 설계에 FDCR을 제약조건 고려한 설계와 고려하지 않은 설계를 모두 진행하였으며, 두 설계안을 비교하여 각 설계안의 특징을 분석하였다.

## 2. 방법론

본 연구는 FDCR를 고려한 밸브의 최적 설계안을 제안하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 기존 설계안에서 수질 사고 위험도를 고려할 수 있는 방법을 조사하였으며, 이를 통해 유향 변경을 인자 FDCR의 사용을 제안하였다. 기존 설계안의 경우 가장 많이 고려되었던 신뢰도 기반 설계법을 선정하였으며, 최적 설계 시 FDCR 고려 유무에 따른 설계안을 비교하였다. 최적화는 GA를 적용하였으며, 수질 사고 위험도 고려 시 FDCR을 별점함수로 사용하였다. 또한 FDCR 고려 유무에 따른 설계안 비교를 위해 수리학적 거리 인자(Hydraulic Geodesic Index, HGI)를 활용하였다. 본 절에서는 밸브 위치에 따른 세그먼트 식별 모형, 수질 고려 인자, HGI, 그리고 설계 모형을 소개

한다. 본 연구에서 개발한 모형은 Python으로 작성되었다.

### 2.1 세그먼트 탐색 알고리즘

세그먼트를 탐색하는 것은 궁극적으로 최적 밸브 위치를 찾기 위함이며, 세그먼트 탐색을 위한 다양한 연구들이 제안되었다(Alvisi et al., 2011; Giustolisi and Savic, 2010; Jun and Loganathan, 2007; Kao and Li, 2007; Walski, 1994). 주로 세그먼트를 구분하기 위해서 상수도 관망을 그래프의 형태로 변환하는 과정을 거치게 된다. 본 연구에서 적용한 Jun and Loganathan (2007)의 알고리즘 또한 세그먼트를 식별하기 위해 총 3가지 행렬을 구축하며, 절점과 관의 연결성에 대한 정보를 저장하는 Node-Arc 행렬, 밸브의 위치를 저장하는 Valve location 행렬, 마지막으로 절점과 관 사이의 밸브 유무를 저장하는 Valve deficiency 행렬이 그 세 가지이다. 해당 행렬들은 모두 관과 절점의 개수를 행과 열의 수로 하도록 구성되며 연결 및 존재 유무에 따라 “1” 또는 “0”을 저장한다(연결 혹은 존재하는 경우 “1” 그 외의 경우 “0”).

Jun and Loganathan (2007)의 알고리즘은 세그먼트를 식별할 때까지 행 방향 탐색과 열 방향 탐색을 반복적으로 수행하게 된다. Fig. 1은 해당 절차에 대한 예시로, 1번 절점에서의 세그먼트를 찾는 과정을 나타낸다. 해당 절차를 모든 절점에 대해서 반복 수행하게 되며 마지막 절점 혹은 모든 절점이 세그먼트에 할당되면 종료한다. 본 연구에서는 설계를 진행하며 Valve location 행렬을 구축하여 구축된 밸브 시스템에 대한 분석을 진행하며, 이 때 행렬의 구축은 Node-Arc 행렬에서 “1”로 저장된 위치가 후보군이 된다.

### 2.2 수질 사고 위험도

본 연구에서는 기존 밸브 시스템 설계에서 고려되지 않았던 수질에 대한 고려 사항을 추가한다. 상수도 관망 내에서 수

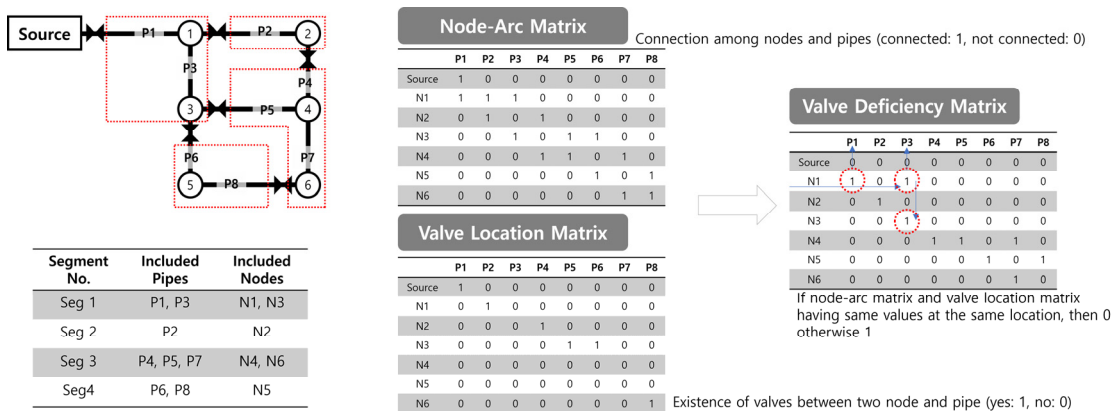


Fig. 1. Procedure to identify segment proposed by Jun and Loganathan (2007)

질 사고는 다양한 원인으로 발생할 수 있으며 대표적인 원인은 유속과 유향 변화가 있다. 유속의 경우 여러 연구들에서 관내 부착물이 탈리될 수 있는 기준 유속을 제시한 바 있으며, 크게 정상 상태의 운영 조건에서 자가세척 유속과 관 세척을 위한 최소 요구 유속의 형태로 나눌 수 있다. 자가세척 유속의 경우 일반적으로 0.2~0.4 m/s의 범위에서 제시되고 있다. 실제 자가세척 관망이 운영되고 있는 네덜란드의 경우 0.4 m/s 자가세척 유속으로 고려하여 설계 및 운영을 하고 있다(Van Den Boomen *et al.*, 2004). 다만, Van Den Boomen *et al.* (2004)는 실제 데이터를 통해 해당 유속이 확보되지 않은 경우에도 세척이 가능함을 확인한 바 있다. 이외 다른 연구에서도 다양한 자가세척 유속 기준이 제안되었으며, Beuken (2001)의 경우 0.2~0.4 m/s, Vreeburg *et al.* (2009)의 경우 0.35 m/s 정도, Blokker *et al.* (2011)에서는 0.2~0.25 m/s으로 제시하고 있다. 국내에서도 Bae *et al.* (2014)의 연구에서 0.35 m/s와 상수도 시설기준에서 제시하는 0.3 m/s 등이 확인되고 있다. 관 세척의 경우 목적에 따라 상이하지만 이보다 빠른 유속을 언급하고 있으며, 일반적으로 0.9 m/s 이상의 유속을 권장하고 있다(Deuerlein *et al.*, 2014; Hong *et al.*, 2020). 이와 같이 유속 기준의 경우 다양하게 제안되어 왔으며, 경우에 따라 그리고 기준 관의 상태에 따라 편차가 존재하는 것으로 확인된다.

유향 변동성은 유속 기준에 비해 수질 사고로 이어질 확률이 높으며, 실제로 Ahn *et al.* (2011)와 Armand *et al.* (2017)에서 단순 유속의 변화보다 역방향 흐름의 경우 침전물의 부유 혹은 관 세척의 효율이 높게 나타남을 언급하였다. 본 연구에서는 가상의 관망에 적용하고 장기 모의(Extended Period Simulation)가 아닌 단시간 모의(Single Period Simulation)를 진행하기에 시간에 따른 수요량 변동을 고려하지 않으므로, 기준이 불확실한 자가세척 유속을 고려하기보다 침전물의 부유가 일어날 위험이 가장 큰 흐름 방향의 변동성에 대해서만 고려하였다. 수질 사고 위험도는 특정 시나리오에서 관로 별 유향이 변경되는 횟수를 정량화되는 FDCR를 사용하였으며, 본 연구에서의 시나리오는 세그먼트의 격리에 해당한다. 즉, FDCR은 밸브 시스템 설계 후 각 세그먼트를 순차적으로 격리하며 관로의 유향을 정상상태와 비교하여 변경된 관로의 비율로, 아래 Eq. (1)과 같이 산정한다.

$$FDCR = \frac{\sum_{i=1}^{n_{segment}} \sum_{j=1}^{n_{pipe}} FDC_j}{n_{segment} \times n_{pipe}} \times 100, \quad (1)$$

$$FDC_j = \begin{cases} 1 & \text{if flow direction changed at pipe } j \\ 0 & \text{if flow direction remains same at pipe } j \end{cases}$$

이때,  $FDC_j$ 는  $j$  관의 유향 변경 여부에 따른 변수이며,  $n_{segment}$ 는 총 세그먼트 개수 그리고  $n_{pipe}$ 는 총 관의 개수를 의미한다. FDCR은 0과 100 사이의 값을 가지며, 0에 가까울수록 수질 사고 위험도가 낮다고 할 수 있다.

### 2.3 Hydraulic Geodesic Index (HGI)

상수도 관망의 경우 기하학적 형상이 그래프와 유사하기에 그래프 이론을 활용하여 절점별 연결성을 분석한 사례가 많다. 본 연구에서도 FDCR 고려 유무에 따른 설계안의 특징을 분석하기 위해 Lee and Jung (2021b)가 제안한 그래프 이론 기반 인자인 HGI를 고려하였다. HGI는 다양한 절점 간의 연결성보다 수원과 각 수요 절점 간의 연결성을 정량화하는 인자이며, 특히 에너지 손실을 간접적으로 반영하고 있다. 즉, 높은 HGI를 가진 수요 절점은 수원과 수리학적 거리가 짧고 에너지 손실은 적다고 할 수 있다. HGI는 여러 그래프 이론의 유형 중 유향-가중 그래프에 기반하며, 이때 고려된 가중치는 EPANET에서 에너지 손실을 계산할 때 사용하는 저항 계수와 동일하며, 아래 Eq. (2)와 같다.

$$w_i = 4.727(\text{norm } C_i)^{-1.852}(\text{norm } D_i)^{-4.871}(\text{norm } L_i) \quad (2)$$

여기서  $w_i$ 는  $i$ 번째 관의 가중치,  $C_i$ 는  $i$ 번째 관의 조도 계수(roughness coefficient),  $D_i$ 는  $i$ 번째 관의 관경,  $L_i$ 는  $i$ 번째 관의 길이이다. 각 변수 앞의 norm은 정규화를 의미하며, 각 변수의 최대값을 통해 산정한다. HG (Hydraulic Geodesic)는 각 수요 절점의 가장 인접한 수원에서 해당 가중치를 고려한 Dijkstra의 최소거리 알고리즘을 통해 결정된 최소 경로에 포함되는 관의 가중치의 합으로 정의할 수 있다. HG의 경우 정규화가 되지 않은 값으로 경우에 따라 매우 큰 값이 결정되는 경우가 있고, 값이 클수록 수원과 연결성은 떨어지기에 직관적이지 않은 결과값을 나타낸다. 이에 HG는 다시 0에서 1 사이의 값을 갖도록 정규화(normalization) 과정을 거치게 되며, 정규화된 값을 각 수요절점에서 HGI로 정의하고 이를 수식으로 나타내면 아래 Eq. (3)과 같다.

$$HGI_k = \frac{1}{(HG_k / \min HG)} \quad (3)$$

여기서, min HG는 상수도 관망 모든 수요 절점에서의 HGI 중 가장 짧은 값으로 정규화를 위해 고려되었다. 최종적으로 HGI는 0에서 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 연결성이 강함을 의미한다. 본 연구에서는 설계안에 따른 세그먼트 격

리 전후의 HGI의 변화에 따른 특징을 파악하는 것이 목적이기에 HGI 변동성을 확인하기 위해 값을 정규화하였으며, 각 수요절점에 대해 세그먼트 격리가 없는 정상상태의 각 절점에서의 HGI를 기준으로 정규화하였다(Eq. (4)).

$$normHGI_{k,s} = \frac{HGI_{k,s}}{HGI_k} \quad (4)$$

위의 수식에서  $k$ 는 수요절점에 연결된 관을 나타내며,  $s$ 는 세그먼트 격리 시나리오를 의미한다. 즉,  $HGI_{k,s}$ 는  $s$  세그먼트 격리 시  $k$  수요절점에서의 정규화된 HGI를 의미 한다. 마지막으로 수요절점별  $normHGI_{k,s}$ 의 평균값을 정규화된 시스템 수리학적 거리 인자(Normalized System hydraulic geodesic index, normSHGI)로 정의하며, 아래 Eq. (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$normSHGI = Avg(normHGI_k) \quad (5)$$

### 2.4 밸브 시스템 설계 모형

밸브 시스템 설계 모형의 계산 절차는 아래 Fig. 2와 같다. 본 연구에서 제안한 설계 모형은 최적 밸브의 위치를 결정

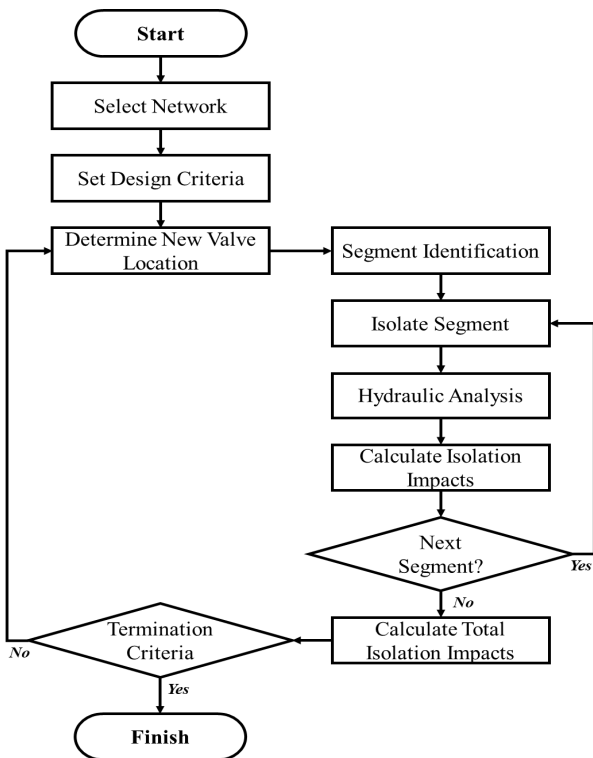


Fig. 2. Flowchart of proposed methodology

하기 위해 일반적으로 많이 사용되는 GA를 적용하였다. 이때 목적 함수로는 신뢰도를 기반으로 설계하되 FDCR은 제약조건으로 고려하였다. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$F_1 = \max(Rel_{Avg}) \quad (6)$$

subject to  $FDCR = 0$   
 $N_{val} = \alpha$

여기서  $Rel_{Avg}$ 은 평균 신뢰도로 각 세그먼트 격리 시 산정된 신뢰도의 평균값이며,  $N_{val}$ 은 또 다른 제약조건으로 총 설치 가능한 밸브의 수를 의미한다. 각 세그먼트 격리 시 신뢰도는 요구수요량 대비 실제수요량의 비로 산정할 수 있고 다음 Eqs. (7)~(11)은 계산을 위한 식들을 나타낸다.

$$Rel_{Avg} = \frac{\sum_{s=1}^{NSegment} p_{segment,s} \times rel_s}{\sum_{s=1}^{NSegment} p_{segment,s}} \quad (7)$$

$$p_{segment,s} = \sum_{i=1}^{npipe_{segment}} p_{pipe,i} \quad (8)$$

$$p_{pipe} = 1 - e^{-Y_i L_i} \quad (9)$$

$$r_{ij} = \frac{0.6858}{D_{ij}^{3.26}} + \frac{2.7158}{D_{ij}^{1.3131}} + \frac{2.7685}{D_{ij}^{2.7685}} + 0.042 \quad (10)$$

$$rel_s = \frac{\sum_{j=1}^{nnodes} Q_{avl,j}}{\sum_{j=1}^{nnodes} Q_{req,j}} \quad (11)$$

이때,  $p_{segment,s}$ 는  $s$  세그먼트 격리 확률로 세그먼트에 포함된 관의 개별 파손확률(breakage probability)의 합으로 산정할 수 있으며,  $rel_s$ 는 세그먼트 격리 시 신뢰도, NSegment는 세그먼트의 총 개수,  $npipe_{segment}$ 는 세그먼트에 포함된 관의 개수,  $p_{pipe,i}$ 는  $i$ 관의 파손확률,  $r_i$ 는  $i$ 관의 길이당 파손율(breakage rate)(breaks/ft)(Su et al., 1987),  $L_i$ 는 관의 길이(ft)  $D_i$ 는 관경(in),  $Q_{avl,j}$ 는 수압기반 실제 수요량,  $Q_{req,j}$ 는 요구 수요량(EPANET base demand)이다. 세그먼트 격리 시 격리되지 않은 구역에서 낮아진 압력으로 인해 실제 전달된 수요량이 요구 수요량보다 낮을 수 있다(Creaco et al., 2012). 이에 따른

영향을 고려하기 위해 압력기반 해석 알고리즘을 탑재한 EPANET 모형(Judi and McPherson, 2015)을 통해 신뢰도와 유량을 결정하였다.

또한 최종 결과의 비교를 위해 본 연구에서는 Jung et al. (2014)에서 제시한 강건성 지표를 변형하여 고려하였다. Jung et al. (2014)은 강건성 지표를 압력의 변동계수를 기반으로 제안을 하였으며, 본 연구에서는 압력뿐만 아니라 HGI와 유속에 대한 변동계수도 고려하여 결과를 비교하였다. 강건성을 나타내는 일반식은 아래 Eq. (12)와 같다.

$$Rob_i[X] = 1 - \frac{\sigma_{X_i}}{X_{avg_i}}, \text{ where } [X \in \text{Vel}, P, HGI] \quad (12)$$

이때,  $X_i$ 는 관심 인자로 유속(Vel), 압력(P), HGI가 해당되며,  $i$ 는 유속인 경우 관을, P와 HGI인 경우 수요절점을 의미한다.  $X_i$ 의 표준편차와 평균은 세그먼트 격리 시 산정되는 관심 인자의 변화에 따라 결정한다. 최종 강건성 인자는 각 관심 인자 별 독립적으로 산정하며, 각 관 혹은 수요절점에서 산정된  $Rob_i$  중 최소값으로 선정하며 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$sysRob[X] = \min(Rob_i[X]) \quad (13)$$

### 3. 적용관망

본 연구에서는 제안한 모형을 6×6 그리드 관망(Fig. 3)에 적용하였다. 해당 관망은 총 61개의 직경이 동일한 관으로 이루어져 있으며, 80 m 수두의 단일 수원에서 중력을 이용하여 총 36개의 수요 절점에 3,409 lps (liter per second)의 수요량을 공급한다. 해당 수요량은 모든 절점에 동일하게 분배되고 있으며, 수요량 변동을 고려하지 않는 단시간(single period) 모의를 진행하였다. Fig. 3에 각 관의 기존 유향과 유속이 같이 표시되어 있으며, 최소요구수압은 28 m이다. 압력기반해석 시 0 m와 28 m를 최소수두와 충족수두로 고려하였다. Fig. 3의 노란색과 붉은색으로 표기된 관의 경우 자가세척 유속 기준을 0.35 m/s로 했을 경우 이에 못 미치는 관으로 해당 관로의 유향이 변경될 경우 다른 관들에 비해 수질 사고의 위험도가 크다고 할 수 있다.

최적화 진행 시 비용에 대한 편차를 제외하기 위해 밸브의 개수( $N_{val}$ )는 전체 밸브 설치 가능한 개수(관 별로 양 끝단에 1개씩 총 2개 설치 가능; 최대 122개) 대비 30~70%(S1에서

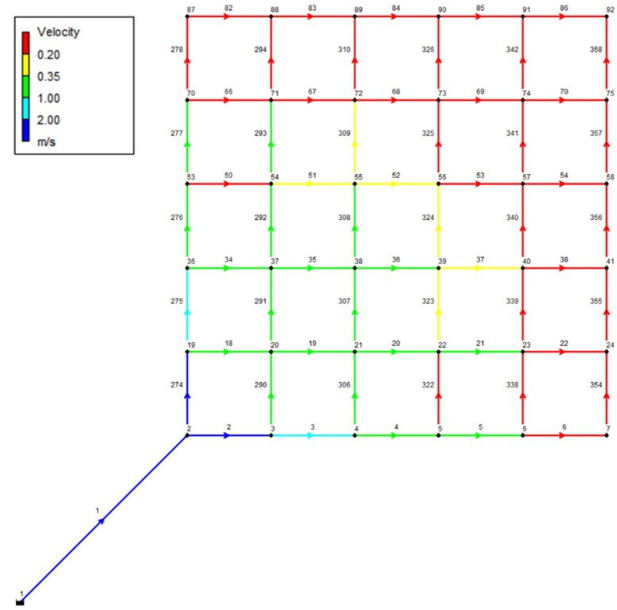


Fig. 3. Layout of study network

S5까지 구분)로 제약조건을 추가하였다. 이 때 기존 신뢰도 기반 설계 시 유향 변경을 인자인 FDCR을 제약조건으로 고려 유무에 따른 설계를 모두 진행하였고, 두 설계안을 비교하여 각 설계안의 특징을 분석하였다. 또한 FDCR과 신뢰도 간의 트레이드오프를 확인하기 위해 이때 NSGA-II(Deb et al., 2002)를 활용하여 다목적 최적설계도 진행하였으며, 본 연구에서 사용한 관망 외 수지형 관망을 고려하여 관망의 형상에 대한 추가적인 분석의 필요성을 검토하였다.

### 4. 결 과

#### 4.1 다목적 최적 설계

본 연구에서 제안한 모형을 통해 최적 밸브 위치를 결정하기에 앞서, 다목적 설계를 통한 FDC와 신뢰도 간의 관계를 분석하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 확인할 수 있는 것과 같이, 두 인자 간에 트레이드오프가 있음을 확인할 수 있으며, 신뢰도만을 고려할 경우 FDCR을 만족시키기 어렵기에, 본 연구에서 제안한 모형을 토대로 설계할 필요가 있다.

#### 4.2 최적 설계 결과

최적화 결과는 Table 1에 요약되어 있다. 설치가능한 밸브의 수에 따라 S1~S5까지 시나리오를 구분하였으며, FDCR 고려 유무에 따라“-1”(FDCR 고려) 또는“-2”(FDCR 미고려)의 숫자를 활용하여 시나리오를 구분하였다.



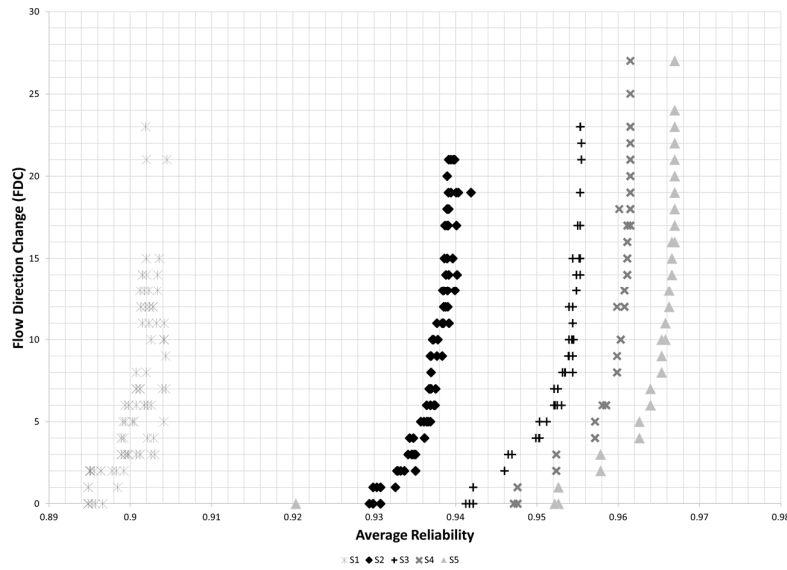


Fig. 4. Multi-objective optimization results

Table 1. Single objective optimal design results

Scenario	# of Valve (Segment)	RelAvg (w/ prob)	RelAvg (wo prob)	Average Shortage (lps)	FDCR (tot FDC)	normSHGI	sysRob (Vel)	sysRob (HGI)	sysRob (P)
S1-1	36 (16)	0.880	0.877	420.23	0.0 (0)	0.877	-0.015	0.635	0.620
S1-2	36 (14)	0.898	0.859	480.26	2.5 (21)	0.857	-0.300	0.599	0.550
S2-1	48 (24)	0.925	0.918	280.15	0.0 (0)	0.918	0.183	0.705	0.688
S2-2	48 (23)	0.928	0.915	288.22	1.8 (25)	0.912	-0.355	0.670	0.661
S3-1	61 (35)	0.942	0.945	186.69	0.0 (0)	0.945	0.444	0.757	0.745
S3-2	61 (34)	0.950	0.943	195.77	1.1 (23)	0.940	-0.199	0.734	0.698
S4-1	73 (40)	0.948	0.957	146.78	0.0 (0)	0.957	0.466	0.774	0.763
S4-2	73 (45)	0.961	0.958	144.30	1.4 (38)	0.953	-0.138	0.766	0.752
S5-1	85 (46)	0.953	0.966	115.29	0.0 (0)	0.966	0.514	0.789	0.780
S5-2	85 (51)	0.967	0.966	116.19	0.8 (25)	0.963	0.148	0.785	0.769

결과를 보면 밸브의 수와 관계 없이 FDCR을 고려하지 않은 설계안에서 유향 변화(tot FDC)가 최소 20회 이상 발생하는 것을 확인할 수 있다. 참고로, 유향 변화가 많은 경우 상대적으로 수질 사고 위험도가 높다고 할 수 있지만, 단 1회 발생으로도 수질 사고는 발생할 수 있기에, 발생 유무 또한 중요한 확인 사항이라 할 수 있다. 전반적인 유량 변경 횟수로 본다면 무조건 많은 수의 밸브가 항시 위험도가 낮게 나오지는 않았다. 이는 Fiorini Morosini *et al.* (2020)의 연구에서도 언급하였듯이 실질적인 상수도 관망의 기능을 유지하는 것에 밸브의 수가 많은 것이 득이 되지 않을 수 있다는 점을 시사하며, 이에 더해 기존 설계안에 따른 수질 사고 위험도도 오히려 밸브가 많이 설치된 관망에서 더 클 가능성이 있다는 점을 시사한다.

이외 대부분의 경우는 좌측 상단 혹은 하단 우측의 관에서 유향이 변경되는 것을 확인할 수 있었다. 유속의 변화 폭은 유사한 유속(기준 약 0.353 m/s)을 가진 34번관과 306번 관에서 크게 나타났는데, 밸브가 50% 이상 설치된 설계안(S3-2, S4-2, S5-2)에서만 특정 세그먼트 격리 시 역방향으로 대략 0.4m/s의 유속이 형성되는 경우가 있음을 확인하였다. 아래 Fig. 5는 S3-1과 S3-2의 최적 밸브 위치 설계안을 보여준다.

Fig. 5를 보면 FDCR을 고려한 설계안(S3-1) 가장 좌측과 하단의 절점 모두에 밸브가 설치된 것을 확인할 수 있다. Fig. 3의 흐름 경로를 보면 가장 좌측 절점의 경우 모두 우측으로 흐름이 발생하며 가장 하단의 절점은 상측으로 흐름이 발생함을 알 수 있다. 이에, FDCR을 고려한 설계안(S3-1) 해당 관에

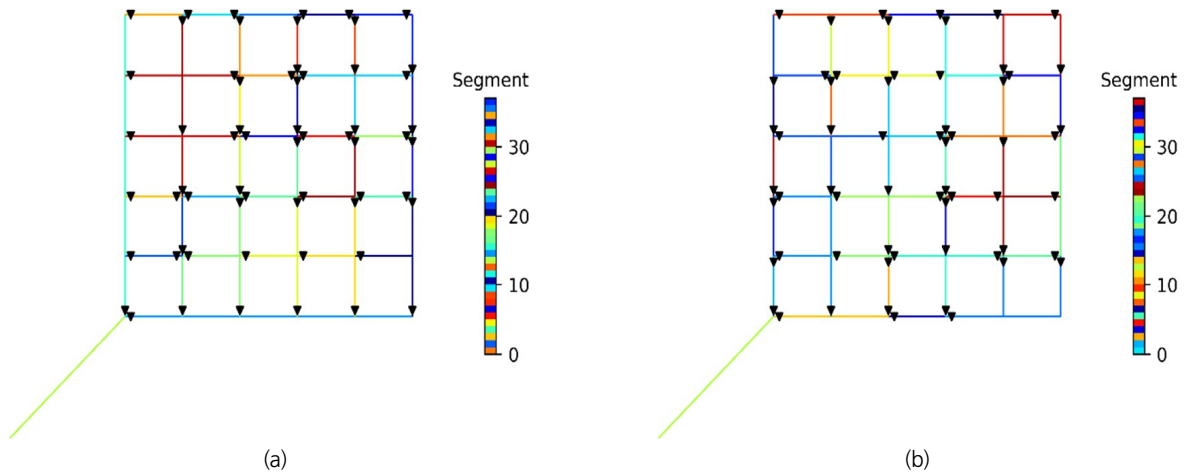


Fig. 5. Optimal valve location of S3-1 (a) and S3-2 (b)

서 역방향 흐름을 제어하기 위해 밸브를 설치하였지만, FDCR을 고려하지 않은 설계안(S3-2) 해당 관에 밸브가 없는 경우가 있어 특정 세그먼트 격리 시 역방향 흐름을 제어할 수 없다. 이에 따라 대부분 역방향 흐름은 관망의 좌측 상단과 하단 우측에서 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 1에 신뢰도는 세그먼트 격리 확률( $p_{segment,s}$ ) 고려 유무에 따라 두 가지로 구분하여 정리하였으며, 고려하지 않은 경우(Rel<sub>Avg</sub> wo prob) Eq. (7)에서 세그먼트 격리 확률을 1로 두고 산정했다. 결과를 보면 목적함수로 사용한 격리확률을 고려한 신뢰도(Rel<sub>Avg</sub> w/ prob)가 밸브의 개수가 동일한 경우 FDCR을 제약조건으로 고려하지 않은 기존 설계안에서 더 높게 나타남을 알 수 있다. 하지만, 격리확률을 고려하지 않는 신뢰도(Rel<sub>Avg</sub> wo prob)의 경우 대부분의 경우에서 FDCR을 고려한 설계안이 높은 신뢰도를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 실제 세그먼트 격리 시 압력 저감량이 FDCR을 고려한 경우에서 더 높게 나타나기 때문이다. 뿐만 아니라 평균 수요량 부족분(Average Shortage)의 경우도 FDCR을 고려한 경우가 적거나 유사한 크기를 가짐을 알 수 있다.

Fig. 6는 S3-1과 S3-2의 평균 압력 차이(%)와 평균 HGI의 차이를 보여준다. Fig. 6의 결과는 S3-2의 평균 압력 혹은 HGI 대비 S3-1의 평균 압력 혹은 HGI의 비율을 %차이로 산정하였으며, Fig.6에서 볼 수 있듯 원으로 표시한 1개의 절점을 제외한 모든 절점에서 FDCR을 고려한 설계안의 평균 압력이 높게 나타남을 확인할 수 있다. 세그먼트 격리 시 피해는 크게 직접고립지역(intended isolation)과 간접고립지역(unintended isolation)으로 구분할 수 있다(Creaco *et al.*, 2012; Lim and Kang, 2019). 직접고립구역의 피해량은 실질적인 세그먼트 내의 요구 수요량의 합 즉, 계획된 수요량만큼의 피해량이 의

도된 격리 구간의 피해로 정의할 수 있다. 간접고립지역의 피해량은 세그먼트 내의 수요량과 별개로 해당 구역이 격리됨에 따른 수압의 저감 혹은 격리로 인해 수원으로부터 완전 격리된 지역의 피해량으로 산정할 수 있다. FDCR을 고려한 설계안은 간접고립이 전혀 발생하지 않는 것으로 확인했으며, FDCR을 고려하지 않은 설계안은 S1-2와 S2-2를 제외하고 나머지 설계안에서 전체 수요량 대비 2~4%가량의 간접고립이 발생하였다. 이와 같은 간접고립 역시 압력 강하의 영향인 것으로 확인되었다.

HGI의 경우도 모든 절점에서 FDCR을 고려한 설계안이 높은 것으로 나타났다. 앞서 언급한 것과 같이 HGI는 가장 인접한 수원에서 해당 절점까지의 최소 수리학적 거리를 정량화하는 지표이며, HGI가 낮아졌다는 것은 기존 경로 대비 특정 세그먼트 격리 시 동일 절점까지의 경로가 길어졌음을 의미한다. 즉, 이러한 흐름 경로의 변화가 압력 저감으로 이어지며 이 결과로 세그먼트 격리 확률을 고려하지 않은 신뢰도(Rel<sub>Avg</sub> wo prob)의 경우 FDCR을 고려한 설계안이 더 높게 산정된다. 앞서 역방향 흐름이 주로 좌측 상단과 하단 우측에서 관측된 것을 언급하였는데, HGI를 통해 이 역방향 흐름이 생긴 이유 역시 설명 가능하다. 마지막으로 normSHGI의 경우 FDCR을 고려한 설계안이 모두 높은 것으로 나타났다. 특히, FDCR을 고려한 설계안의 경우 normSHGI의 크기가 세그먼트 격리 확률을 고려하지 않은 신뢰도(Rel<sub>Avg</sub> wo prob)와 동일하게 나타났다. 이는 2가지 이유로 유추할 수 있는데, 첫 번째는 FDCR을 고려한 설계안이 격리 유무를 떠나 각 수요절점을 최소 경로로 유지하게 됨으로써 간접고립으로 인한 피해가 없기 때문이다. 두 번째는 모든 수요절점의 수요량이 동일하다는 점으로, 이로 인해 격리된 수요절점의 수 만큼만 신뢰도가 감소하



고 normSHGI도 감소하게 된다. 이러한 경향은 본 연구에서 적용한 관망의 특수성 측면에서 발생한 것이지만, FDCR 고려 유무에 따른 설계 결과 기반 두 지표의 격차를 줄여주면(즉 normSHGI를 극대화시키면) 유향 변동성 또한 줄일 가능성이 있음을 보여준다.

마지막으로 설계안의 유속, HGI 그리고 압력의 안정성을 평가하기 위해 인자별 강건성(Table 1에서 sysRob (Vel), sysRob (P), sysRob (HGI))을 확인하였다. 결과를 보면, 모든 경우에서 FDCR을 고려한 설계가 기존 정상 운영 대비 유속, HGI, 압력을 잘 유지함을 확인할 수 있다. 이는 FDCR을 고려한 설계가 비단 수질 사고 위험률을 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 기존 설계안 대비 특정 세그먼트 격리 시에도 기존 운영 상태를 잘 유지할 수 있다는 것을 의미한다.

### 4.3 관망의 형태에 따른 설계안 비교

Hwang and Lansey (2017)의 연구에서 관망의 형상에 따른 분류를 하였고, 적용한 관망의 경우 루프형 관망에 속해 있다. 앞서 살펴본 결과와 달리 수지형 관망에서의 결과를 비교하기 위한 분석을 추가로 진행하였으며, 적용한 수지형 관망의 형태와 최적 설계 결과는 Fig. 7과 같다.

수지형 관망의 경우 격리로 인한 유향 변경이 될 수 없기에, FDCR의 고려 유무를 떠나 동일한 밸브 위치와 동일한 성능을 나타냄을 확인하였다. 즉, 수지형으로 구성된 관망의 경우 기존 설계안을 고려하여도 무방한 것으로 보이며, 유향이 변경될 가능성이 있는 루프형 관망에 대해서만 FDCR을 고려한 설계가 효과적이라 할 수 있다.

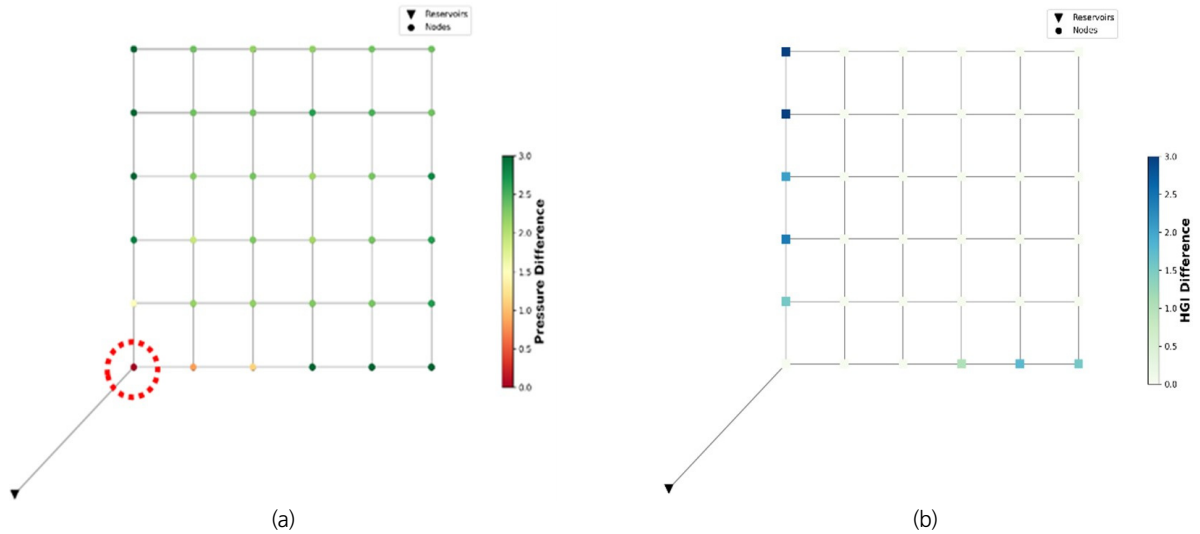


Fig. 6. Pressure (a) and hydraulic geodesic index (b) difference between S3-1 and S3-2

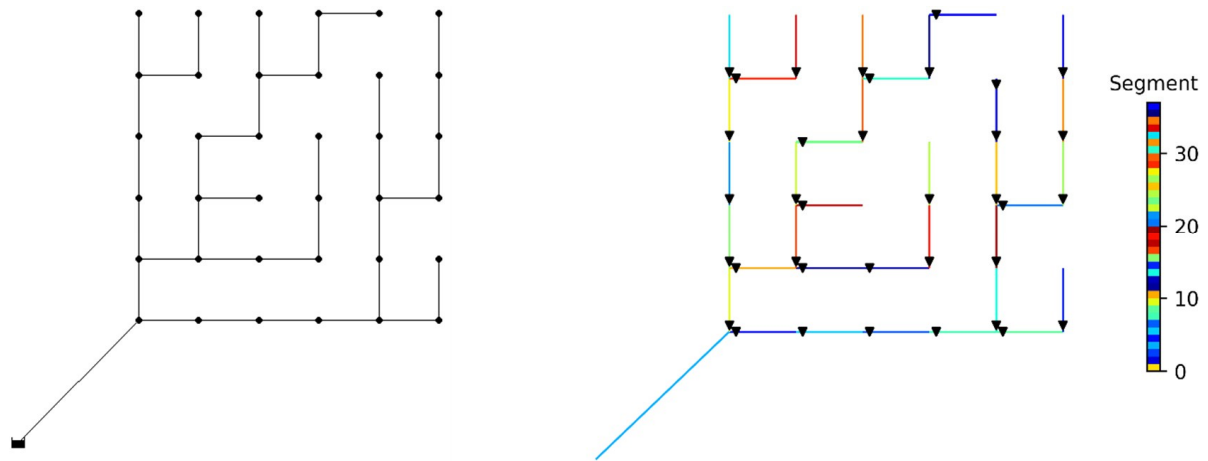


Fig. 7. Layout and optimal design results of branched network

## 5. 결론

본 연구에서는 기존 밸브 설계 시 고려되지 않은 잠재적 수질 사고 위험을 줄이기 위한 설계 방법을 제안하였다. 이를 위해 흐름의 변화에 대한 영향을 판단할 수 있는 FDCR의 사용을 제안하였으며, FDCR의 고려 유무에 따른 설계안을 비교하여 개선점을 분석하였다. 제안한 방법론은 6×6 그리드 관망에 적용하였고, 비용에 대한 영향을 줄이기 위해 밸브의 개수를 제한하여 최적 설계를 진행하였다. 분석한 시나리오의 타당성을 검증하기 위해 다목적 최적 설계를 통해 FDCR과 신뢰도 간의 트레이드오프를 확인하였고, 수지형 관망에 적용하여 루프형 관망에서의 해석이 더 중요함을 확인하였다.

분석 결과 FDCR을 고려하지 않은 경우 유향 변화가 20회 이상 발생하였고, 이때 유속의 변동폭은 설치된 밸브의 수가 많을 때 더 크게 발생함을 확인했다. 신뢰도의 경우 세그먼트 격리 확률 고려 시 FDCR을 고려하지 않은 설계안이 더 높은 값을 가짐을 확인했지만, 세그먼트 격리 확률을 고려하지 않은 경우 오히려 낮은 값을 가짐을 확인하였다. 이는 FDCR을 고려하지 않은 설계안에서 유향 변동으로 인해 흐름 경로가 길어져 추가적인 수두가 손실되었기 때문으로 확인되었다. 실제로 절점별 평균 HGI와 압력이 FDCR을 고려하지 않은 경우가 더 낮은 것으로 나타났다. 또한 동일한 원인으로 인해 FDCR을 고려하지 않은 경우 간접고립지역이 추가로 발생하는 것을 확인하였다. 마지막으로 유속, HGI, 그리고 압력의 안정성을 강건성 토대로 분석한 결과 모든 인자에 대해 FDCR을 고려한 설계안에서 특정 세그먼트 격리 시에도 상수도 관망의 안정적인 운영이 가능함을 확인하였다.

본 연구에서는 기존 고려되지 않았던 유향인자를 추가로 고려하여 밸브 시스템을 설계한 것에 의의가 있다. 다만, 수질 사고는 유향 변경에 의해서만 고려된 것이 아니기에 조금 더 구체적인 수질 사고 위험도를 설정해줄 필요가 있다. 예를 들어 2.2절에서 조사한 것과 같이 유속 변동에 대해서도 사고가 발생할 수 있기에, 유향 외의 유속 변동에 대한 부분을 고려해주는 것이 필요하다. 또한, 본 연구에서는 가상 관망을 통해 진행된 내용을 실제 관망에 적용하여 결과를 비교해 볼 필요가 있으며, 특히 기존 설치된 밸브 위치에 따른 영향 평가 및 향후 추가 밸브 설치 시 적용하여 예기치 못한 수질 피해를 예방하기 위한 새로운 설계법으로 활용할 수 있을 것으로 생각한다. 마지막으로 본 연구에서 사용한 세그먼트 식별 알고리즘의 개선에 대한 부분으로 Jeong et al. (2021)의 연구에서 본 연구에서 활용한 Jun and Loganathan (2007)의 세그먼트 식별 알고리즘이 주로 수지형 관망에서 간접고립구역을 정상적으로 식별하지 못하

는 단점을 지적하고 개선한 바 있다. 본 연구에서 적용한 관망의 형태가 루프형 그리드 관망으로 해당 문제점이 크게 부각되지 않아 문제가 없지만, 향후 실제 관망에 적용할 경우 세그먼트 식별 알고리즘의 수정이 필요할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2021 학년도 한남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Abraham, E., Blokker, M., and Stoianov, I. (2018). "Decreasing the discoloration risk of drinking water distribution systems through optimized topological changes and optimal flow velocity control." *Journal of Resources Planning and management*, Vol. 144, No. 2, pp. 6-8.
- Ahn, J.C., Lee, S.W., Choi, K.Y., Koo, J.Y., and Jang, H.J. (2011). "Application of unidirectional flushing in water distribution pipes." *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, Vol. 60, No. 1, pp. 40-50.
- Alvisi, S., Creaco, E., and Franchini, M. (2011). "Segment identification in water distribution systems." *Urban Water Journal*, Vol. 8 No. 4, pp. 203-217.
- Armand, H., Stoianov, I., and Graham, N. (2015). "Investigating the impact of sectorized networks on discoloration." *Procedia Engineering*, Vol. 119, pp. 407-415.
- Armand, H., Stoianov, I., and Graham, N. (2017). "A holistic assessment of discoloration processes in water distribution networks." *Urban Water Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 263-277.
- Bae, C.-H., Choi, D.Y., Kim, J.-H., and Kim, D.-H. (2014). "The assessment of self cleaning velocity and optimal flushing velocity in water distribution system." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 28, No. 4, pp. 441-451.
- Berardi, L., Ugarelli, R., Røstum, J., and Giustolisi, O. (2014). "Assessing mechanical vulnerability in water distribution networks under multiple failures." *Water Resources Research*, Vol. 50, No. 3, pp. 2586-2599.
- Beuken, R.H.S. (2001). *Validation new design rules for DWDS: Lab experiments on standard sediment' (In Dutch)*. Report number: BTO 2001.171, Kiwa WR N.V., Nieuwegein, The Netherlands.

- Blokker, E.M., Schaap, P.G., and Vreeburg, J.H. (2011). "Comparing the fouling rate of a drinking water distribution system in two different configurations." *11th International Conference on Computing and Control for the Industry Urban Water Management, Exeter*, CCWI, Exeter, UK, pp. 1-6.
- Boxall, J., and Saul, A. (2005). "Modeling discoloration in potable water distribution systems." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 131, No. 5, pp. 716-725.
- Brentan, B., Monteiro, L., Carneiro, J., and Covas, D. (2021). "Improving water age in distribution systems by optimal valve operation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 147, No. 8, 04021046.
- 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.
- Deb, A., Grablutz, F., Hasit, Y., Snyder, J., Loganathan, G., and Agbenowski, N. (2002). *Prioritizing water main rehabilitation and replacement*. American Water Works Association Research Foundation, Denver, CO, U.S.
- Deuerlein, J., Simpson, A., and Korth, A. (2014). "Flushing planner: A tool for planning and optimization of unidirectional flushing." *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 497-506.
- Dias, V.C., Besner, M.C., and Prévost, M. (2017). "Predicting water quality impact after district metered area implementation in a full-scale drinking water distribution system." *Journal-American Water Works Association*, Vol. 109, No. 9, pp. E363-E380.
- Fiorini Morosini, A., Caruso, O., and Veltri, P. (2020). "Management of water distribution systems in PDA conditions using isolation valves: Case studies of real networks." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 22, No. 4, pp. 681-690.
- Giustolisi, O. (2019). "Water distribution network reliability assessment and isolation valve system." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 146, No. 1, 04019064.
- 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.
- Goldberg, D.E., Korb, B., and Deb, K. (1989). "Messy genetic algorithms: Motivation, analysis, and first results." *Complex Systems*, Vol. 3, No. 5, pp. 493-530.
- Gupta, R., Baby, A., Arya, P., and Ormsbee, L. (2014). "Upgrading reliability of water distribution networks recognizing valve locations." *Procedia Engineering*, Vol. 89, pp. 370-377.
- Hernandez, E., and Ormsbee, L. (2018) "Application of segment based robustness assessment for water distribution networks." *WDSA/CCWI Joint Conference Procedia*, Kingston, Ontario, Canada.
- Hernandez, E., and Ormsbee, L. (2022). "A heuristic for strategic valve placement." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 148, No. 2, 04021103.
- Hong, S., Lee, C., Park, J., and Yoo, D.G. (2020). "Velocity-based decision of water quality measurement locations for the identification of water quality problems in water supply systems." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53 No. 11, pp. 1015-1024.
- Husband, S., and Boxall, J. (2016). "Understanding and managing discoloration risk in trunk mains." *Water Research*, Vol. 107, pp. 127-140.
- 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.
- Jeong, G., Lim, G., and Kang, D. (2021). "Identification of unintended isolation segments in water distribution networks using a link-by-link adjacency matrix." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 147, No. 2, 06020013.
- Judi, D.R., and McPherson, T.N. (2015). *Development of extended period pressure-dependent demand water distribution models*. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, U.S.
- Jun, H., and Loganathan, G. (2007). "Valve-controlled segments in water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 133, No. 2, pp. 145-155.
- Jung, D., Kang, D., 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 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.
- Kao, J.J., and Li, P.H. (2007). "A segment-based optimization model for water pipeline replacement." *Journal of American Water Works Association*, Vol. 99, No. 7, pp. 83-95.
- Kim, D., Cheon, S., and Hyun, I. (2015). "A study on the removal of particulate matters using unidirectional flushing." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 29, No. 3, pp. 371-380.
- Lee, S., and Jung, D. (2021a). "Accounting for phasing of isolation valve installation in water distribution networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 147, No. 7, 06021007.
- Lee, S., and Jung, D. (2021b). "Shortest-path-based two-phase design model for hydraulically efficient water distribution network: Preparing for extreme changes in water availability." *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 53358-53369.
- 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*, Vol. 52, No. 4, pp. 291-300.
- Meng, F., Sweetapple, C., and Fu, G. (2018). "Placement of isolation valves for resilience management of water distribution systems." *WDSA/CCWI Joint Conference Procedia*, Kingston, Ontario, Canada.
- Poulin, A., Mailhot, A., Periche, N., Delorme, L., and Villeneuve, J.-P. (2010). "Planning unidirectional flushing operations as a response to drinking water distribution system contamination." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.

- 136, No. 6, pp. 647-657.
- Sass Braga, A., Saulnier, R., Fillion, Y., and Cushing, A. (2020). "Dynamics of material detachment from drinking water pipes under flushing conditions in a full-scale drinking water laboratory system." *Urban Water Journal*, Vol. 17, No. 8, pp. 745-753.
- Shuang, Q., Liu, Y., Tang, Y., Liu, J., and Shuang, K., (2017). "System reliability evaluation in water distribution networks with the impact of valves experiencing cascading failures." *Water*, Vol. 9, No. 6, 413.
- Shin, S., Lee, S., Judi, D.R., Parvania, M., Goharian, E., McPherson, T., and Burian, S.J. (2018). "A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems." *Water*, Vol. 10, No. 2, 164.
- Su, Y.C., Mays, L.W., Duan, N., and Lansley, K.E. (1987). "Reliability-based optimization model for water distribution systems." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 113, No. 12, pp. 1539-1556.
- Van Den Boomen, M., Van Mazijk, A., and Beuken, R. (2004). "First evaluation of new design concepts for self-cleaning distribution networks." *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, Vol. 53, No. 1, pp. 43-50.
- Vreeburg, J., Blokker, E.M., Horst, P., and Van Dijk, J. (2009). "Velocity-based self-cleaning residential drinking water distribution systems." *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol. 9, No. 6, pp. 635-641.
- Walski, T.M. (1994). *Valves and water distribution system reliability*. American Water Works Association National Convention, New York, NY, U.S.
- Yang, Z., Guo, S., Hu, Z., Yao, D., Wang, L., Yang, B., and Liang, X. (2022). "Optimal Placement of New Isolation Valves in a Water Distribution Network Considering Existing Valves." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 148, No. 6, 04022032.