J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 52, No. 4 (2019), pp. 291-300
doi: 10.3741/JKWRA.2019.52.4.291
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

Optimal placement of isolation valves in water distribution networks based on segment analysis

Lim, Gabyul[a] · Kang, Doosun[b]*

[a]Researcher, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea
[b]Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

Paper number: 19-006
Received: 30 January 2019; Revised: 17 March 2019; Accepted: 17 March 2019

Abstract

If pipes are damaged in a water distribution network (WDN), adjacent valves are closed to isolate the pipes for repair. Due to the closed valves, parts of WDN are isolated from water supply sources. The isolated area is divided into Intended Isolation Area (IIA) and Unintended Isolation Area (UIA). The IIA occurs by intention to isolate the damaged pipe, while UIA is unintentionally disconnected from the sources due to IIA. Thus, the extension of isolated area and suspended flows are mainly affected by number and location of installed valves in WDN. In this study, optimization models were developed to determine optimal valve locations in WDN. In a single-objective model, total water supply suspension is minimized, while a multi-objective model intends to simultaneously minimize the suspended flow and valve installation cost. Optimal valve placement results obtained from both models were compared and analyzed using a sample application network.

Keywords: Intended and unintended isolation area, Optimization, Valve placement, Water distribution network

단수구역 해석을 이용한 상수관망시스템 내 최적 밸브위치 결정

임갑율[a] · 강두선[b]*

[a]경희대학교 사회기반시스템공학과 석사 후 연구원, [b]경희대학교 사회기반시스템공학과 교수

요 지

상수관망시스템 내 관로가 파손될 경우, 수리를 위해 파손 관로와 인접한 밸브를 차폐하게 된다. 이때, 밸브 차폐로 인해 관망의 일부분이 고립되어 용수공급이 차단되는 단수구역이 발생하게 된다. 단수구역은 파손 관을 포함한 직접고립지역과 직접고립지역으로 인해 의도치 않게 수원으로부터 물 공급이 차단되는 간접고립지역으로 구분된다. 따라서, 관 파손에 의한 단수구역 및 단수용량은 시스템 내 설치된 밸브의 개수와 위치에 크게 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 상수관망시스템 내 최적의 밸브위치를 결정하기 위해 최적화 모형을 개발하고 적용하였다. 예시 관망을 대상으로 단수용량 최소화를 목적함수로 설정한 단목적 최적화와 단수용량과 밸브 설치비용을 동시에 최소화하는 다목적 최적화를 각각 수행하였으며, 두 가지 모형을 통해 도출된 최적 밸브설치 결과를 비교, 분석하였다.

핵심용어: 직·간접고립지역, 단수구역, 밸브위치선정, 상수관망, 최적화

***Corresponding Author.** Tel: +82-31-201-2513
E-mail: doosunkang@khu.ac.kr (D. Kang)

© 2019 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

상수관망시스템은 깨끗한 용수를 수요처에 안정적으로 공급하기 위한 사회기반시설물이다. 우리나라의 경우 도시화 및 생활수준의 향상으로 상수도 보급률이 약 96.4%에 도달하였으며, 지속적인 관리와 개량이 이루어지고 있다. 상수관망시스템의 설계 및 운영은 정상상황에서의 용수공급뿐만 아니라 갑작스런 수요증가와 관로 파손 등 비정상상황에서의 용수공급을 함께 고려해야 한다.

상수관로의 매설 후에는 노후화, 자연재해(지진), 작업자의 실수 등으로 인한 관로의 파손 가능성이 존재하며, 상수관이 파손될 경우 파손 관의 보수 및 교체를 위해 파손 관과 인접한 밸브를 차단함으로써 시스템의 일부를 격리하게 된다. 이때, 밸브를 차단함으로 인해 파손 관과 함께 용수공급이 차단되는 단수구역을 직접고립지역(Intended Isolation Area, IIA)으로 정의하고, 직접고립지역이 격리됨으로써 의도치 않게 수원으로부터 용수공급이 차단되는 지역을 간접고립지역(Unintended Isolation Area, UIA)으로 정의한다(Jun and Loganathan, 2007). 이때, 밸브의 개수가 부족하거나 적절한 위치에 배치되어 있지 않은 경우, 단수구역이 넓어져 단수피해가 증가하게 된다. 즉 동일한 관이 파손되더라도 단수구역은 밸브의 개수 및 위치에 따라 달라지게 되므로, 관 파손에 의한 단수피해를 최소화하기 위해서는 적절한 밸브의 개수 및 위치를 파악할 필요가 있다.

국내에서도 밸브위치에 따른 단수구역 산정에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다. Jun (2005)은 상수관망의 안전도 확보, 부가적 용수공급로 확보 문제 등을 통해 밸브의 중요성을 강조하였다. 또한, 관의 파괴로 인해 상수관망의 일부를 격리할 경우 파손 관로뿐만 아니라 주변의 다른 관로도 함께 격리될 수 있으며, 관망에 설치된 밸브의 위치에 따라 달라질 수 있음을 제시하여 각 밸브의 중요도와 효율성 평가에 활용하였다. Jun (2006)은 더 나아가 파손 관로만을 피해영역으로 고려하던 기존의 단수구역 산정 방법의 문제점을 지적하고, 밸브 위치에 따른 추가적인 피해영역을 고려할 수 있는 방법을 제안하고, 실제 상수관망에 적용하였다. Kim *et al*. (2007)은 직접고립지역(Walski, 1993)과 간접고립지역(Jun and Loganathan, 2007)의 정의를 도입하여 관로 파손에 의한 피해영역을 합리적으로 추정하고, 이를 적용한 신뢰도 분석 모형을 개발하였다. Yoo *et al*. (2017)은 용수공급 안정화를 위한 연계관로 설계 문제를 대상으로 공사비와 관로 파손시의 용수 공급능력을 고려한 최적설계 모형을 개발하였으며, 용수 공급능력 산정 과정에서 현실적인 모의를 위해 밸브 차단에 의해 발생하는 단수구역을 고려하였다. Choi *et al*. (2017)은 상수관망의 강건성을 향상시키기 위한 방법으로 제수밸브의 최적 구축을 통해 단수구역을 분할하는 기법을 제시한 바 있다.

국외에서 수행된 관련 연구를 살펴보면 Jun and Loganathan (2007)이 간접고립지역을 정의하고, 직접고립지역과 간접고립지역을 탐색하기 위한 알고리즘을 제시하였다. Li and Kao (2007)는 단수구역을 기반으로 상수관망의 취약성을 분석하는 연구를 수행하였으며, Giustolisi and Savic (2010)와 Creaco *et al*. (2010)은 상수관망시스템에서 단수구역을 고려한 최적 밸브위치 결정을 위한 연구를 수행한 바 있다. Alvisi and Franchini (2014)는 상수관망의 블록 감시제어 시스템을 자동으로 생성하는 연구를 수행하였고, Alvisi *et al*. (2011)은 체크밸브를 고려한 직접고립지역 산정 방안을 제시하였으며, Mahmoud *et al*. (2017)은 Network Topological Matrices (NTM)를 이용한 단수구역 식별 방법을 제시하는 연구를 수행하였다. Hernandez and Ormsbee (2018)는 상수관망시스템의 단수구역을 기반으로 시스템의 강건성을 평가하는 연구를 수행한 바 있다. 특히, Creaco *et al*. (2010)이 제시한 최적 밸브위치 결정 연구는 Topological matrix를 이용하여 직, 간접고립지역을 탐색하였고, 고립지역의 단수용량은 정상상태의 총 공급유량과 해당 고립지역을 제거한 네트워크의 총 공급유량을 비교하여 산정하였다. 해당 방법은 밸브위치가 달라짐에 따라 Topological matrix의 크기가 변화하며, 단수용량 산정을 위해 추가적인 수리해석이 필요한 단점이 존재한다.

본 연구에서는 관 파손이 일어나 밸브가 차폐되는 경우 발생하는 단수구역을 직접고립지역과 간접고립지역으로 나누어 파악하고, 이를 통해 단수용량을 산정하였다. 이때, 간접고립지역 산정을 위한 새로운 알고리즘을 제시하여 계산시간 단축과 함께 정확한 단수용량을 계산하였다. 최적 밸브위치 선정을 위해 밸브 설치에 따른 비용과 단수용량을 동시에 고려한 다목적 최적화 기법을 적용하였다. 개발 모형은 루프(Loop)형태의 예제관망을 이용하여 적용성을 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성하였다. 2장에서는 밸브 위치에 따른 단수구역 탐색 기법을 직접고립지역과 간접고립지역으로 구분하여 설명하였다. 3장에서는 밸브위치 최적화 모형을 설명하였으며, 적용한 최적화 기법 및 결정변수와 목적함수에 관해 서술하였다. 4장의 적용 및 결과에서는 최적화 모형을 예제관망에 적용한 결과를 상세히 분석하였다. 마지막으로 5장에서는 본 연구를 통해 도출된 결론을 제시하였다.

2. 단수구역 탐색 방법

2.1 직접고립지역(Intended Isolation Area) 탐색 방법

직접고립지역의 탐색을 위해서는 Node-Arc matrix, Valve Location matrix와 Valve Deficiency matrix 등 3개의 행렬을 생성하고, 생성된 행렬을 통해 탐색을 진행한다. 직접고립지역의 탐색 과정은 다음과 같다(Jun and Loganathan, 2007).

2.1.1 Node-Arc matrix 생성

Node-Arc matrix는 상수관망의 기본 구조인 절점(Node)과 관로(Arc)의 연결 상태를 나타내는 행렬로, 절점을 나타내는 행(Row)과 관로를 나타내는 열(Column)로 구성된다. 행렬 내 각 위치의 절점과 관로가 직접 연결되어 있을 경우 1, 연결되어 있지 않은 경우 0의 요소값을 갖는다.

2.1.2 Valve Location matrix 생성

Valve Location matrix는 상수관망 내 밸브의 위치를 나타내는 행렬로, Node-Arc matrix와 동일한 구조로 구성되며, 해당하는 절점과 관로의 위치에 밸브가 설치된 경우 1, 설치되어 있지 않은 경우 0의 요소값을 갖는다.

2.1.3 Valve Deficiency matrix 생성

Valve Deficiency matrix는 상수관망 내 밸브가 설치되어 있지 않은 위치를 나타내는 행렬로, Node-Arc matrix에서 Valve Location matrix를 차감하여 구할 수 있다. Valve Deficiency matrix의 경우 절점과 관로의 연결지점에 밸브가 설치되어 있지 않은 경우 1, 설치된 경우 0의 요소값을 갖는다.

2.1.4 Valve Deficiency matrix를 이용한 직접고립지역 탐색

Fig. 1은 본 연구에서 적용한 예시 관망이며, 1개의 수원으로부터 용수를 공급받는 7개의 절점이 8개의 관로로 연결된 루프형 구조의 관망이다. Fig. 2는 예시 관망에서 P7 관로가 파손된 경우 Valve Deficiency matrix를 이용하여 직접고립지역을 탐색하는 과정을 나타낸 그림이다. ① 파손된 관로(P7)에 해당하는 열에서 1을 요소로 가지고 있는 행을 탐색한다(N4). ② N4 행으로부터 1을 요소로 가지고 있는 열을 재탐색한다(P6). ③ P6 열로부터 1을 요소로 가지는 새로운 행을 탐색한다(N5). ④ 새로운 1을 포함하는 행이나 열이 탐색되지 않을 때까지 반복적으로 열과 행을 번갈아가며 탐색하며, 이 과정에서 탐색된 절점과 관로 요소들을 직접고립지역에 속하는 절점과 관로로 정의한다. Fig. 2는 탐색이 종료된 시점에서의 결과를 나타낸 표이며, 예시 관망에서 P7 관로가 파손되었을 경우, N4, N5 절점과 P6, P7 관로가 직접고립지역에 해당하는 것을 확인할 수 있다.

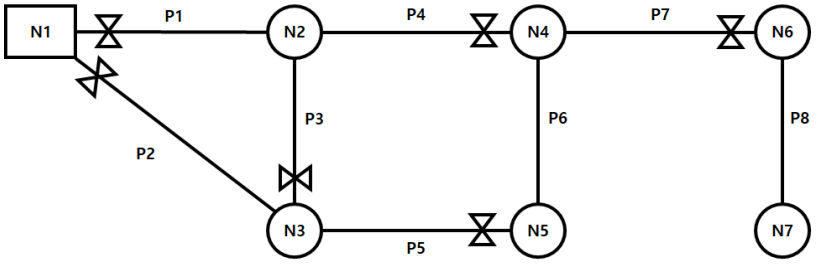


Fig. 1. Sample network

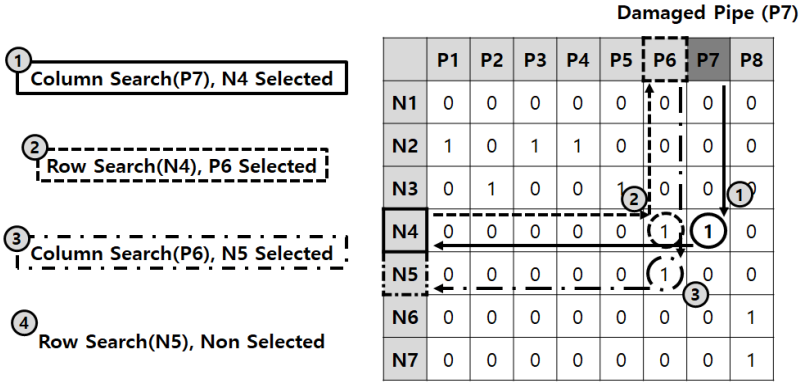


Fig. 2. Intended isolation area search (P7 damaged)

2.2 개선된 간접고립지역(Unintended Isolation Area) 탐색 방법

Jun and Loganathan (2007)이 제안한 간접고립지역 탐색 방법은 일부 상황(즉, 가지형 네트워크에서 직접고립지역에 관로만 포함될 경우)에서 간접고립지역이 탐색되지 않는 문제점이 존재하며, 본 연구에서는 이를 보완한 개선된 간접고립지역 탐색 방법을 적용하였다. 개선된 기법은 Link-based Adjacency matrix를 이용하며(기존 방법은 Node-based Adjacency matrix 이용), 탐색 과정은 다음과 같다.

2.2.1 Link-based Adjacency matrix 생성

Link-based Adjacency matrix는 관로와 관로 사이의 연결관계를 나타내는 행렬이며, 행과 열이 모두 관로로 구성된다. 두 관로가 동일한 절점으로 연결되어 있는 경우 1, 연결되어 있지 않은 경우 0을 요소값으로 갖는다. 따라서, 주대각선을 기준으로 대칭 구조를 갖는다.

2.2.2 직접고립지역 탐색 결과 반영(전처리 과정)

간접고립지역 탐색에 앞서 Link-based Adjacency matrix에 직접고립지역의 탐색 결과를 반영해야 한다. 이때, 직접고립지역에 포함된 절점이 존재하지 않는 경우, 직접고립지역은 관로 하나만으로 구성되며 해당 관로의 행과 열의 요소값을 모두 0으로 치환함으로써 해당 관로를 시스템에서 고립시킨다. 만일, 직접고립지역에 절점이 포함된 경우, 해당 절점과 연결된 관로를 탐색한 후, 행과 열의 공통 요소값을 0으로 치환한다. 이러한 과정을 통해 직접고립지역이 주변 관로와 연결성이 끊어진 것을 반영할 수 있다. 앞선 직접고립지역 탐색 결과, N4, N5 절점이 직접고립지역에 포함되며, 따라서 N4, N5와 연결된 P4, P5, P6, P7 관로가 전처리 대상에 포함된다. Fig. 3은 전처리 작업(직접고립지역 반영) 전, 후의 Link-based Adjacency matrix를 보여주고 있다.

2.2.3 간접고립지역 탐색

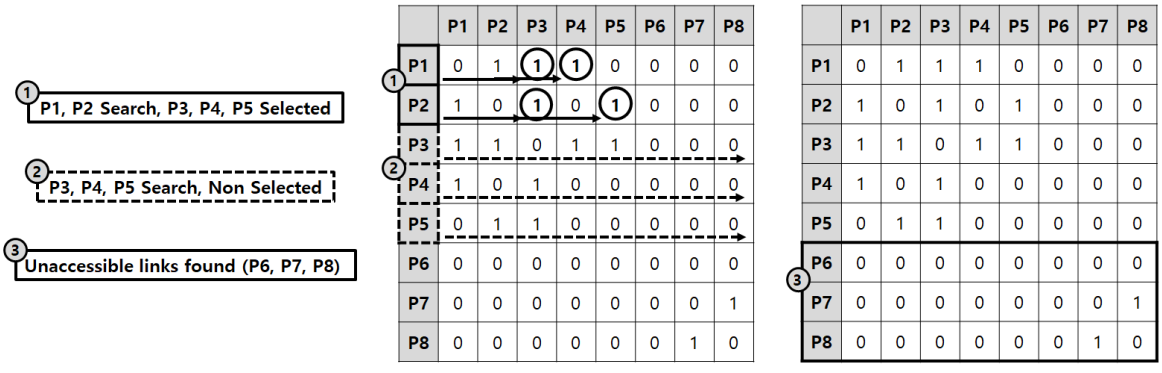
Fig. 4는 예시 관망에 대하여 P7 관로 파손 상황 시 간접고립지역 탐색 과정을 나타내고 있다. ① 수원(N1)과 직접적으로 연결된 관로(P1, P2)로부터 탐색을 시작하며, 해당 관로의 행에서 1을 요소로 가지고 있는 열을 탐색한다(P3, P4, P5). ② 새롭게 탐색된 관로(P3, P4, P5)의 행으로부터 다시 1을 요소

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	0	1	1	1	0	0	0	0
P2	1	0	1	0	1	0	0	0
P3	1	1	0	1	1	0	0	0
P4	1	0	1	0	0	**1**	**1**	0
P5	0	1	1	0	0	**1**	0	0
P6	0	0	0	**1**	**1**	0	**1**	0
P7	0	0	0	**1**	0	**1**	0	1
P8	0	0	0	0	0	0	1	0

Reflecting Intended isolation area (P4, P5, P6, P7)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	0	1	1	1	0	0	0	0
P2	1	0	1	0	1	0	0	0
P3	1	1	0	1	1	0	0	0
P4	1	0	1	0	0	**0**	**0**	0
P5	0	1	1	0	0	**0**	0	0
P6	0	0	0	**0**	**0**	0	**0**	0
P7	0	0	0	**0**	0	**0**	0	1
P8	0	0	0	0	0	0	1	0

Fig. 3. Link-based adjacency matrix reflecting intended isolation area



	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	0	1	1	1	0	0	0	0
P2	1	0	1	0	1	0	0	0
P3	1	1	0	1	1	0	0	0
P4	1	0	1	0	0	0	0	0
P5	0	1	1	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	0	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	0	1
P8	0	0	0	0	0	0	1	0

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	0	1	1	1	0	0	0	0
P2	1	0	1	0	1	0	0	0
P3	1	1	0	1	1	0	0	0
P4	1	0	1	0	0	0	0	0
P5	0	1	1	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	0	0	0
P7	0	0	0	0	0	0	0	1
P8	0	0	0	0	0	0	1	0

Fig. 4. Unintended isolation area search (P7 damaged)

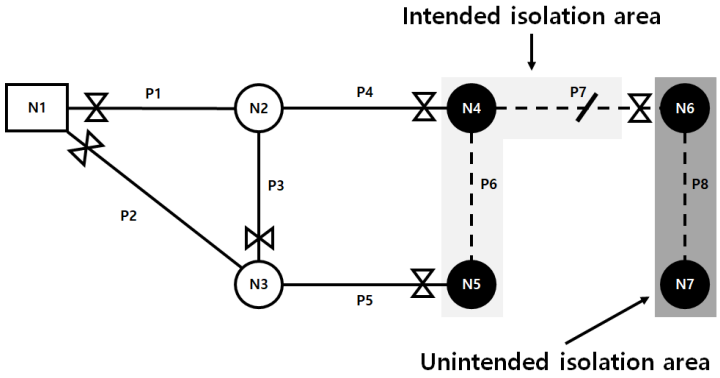


Fig. 5. Intended and unintended isolation area when P7 damaged

로 하는 새로운 열을 탐색하며, 더이상 새로운 열이 탐색되지 않는다면 탐색을 종료한다. ③ 이 과정에서 탐색된 관로들은 수원과 연결된 상태로 용수공급이 가능한 관로이며, 탐색 과정에서 제외된 관로들은 용수공급이 불가능한 관로로 정의된다.

즉, P6, P7, P8 관로가 용수공급이 차단된 관로임을 확인할 수 있고, 이들 중 직접고립지역에 해당하는 P6, P7 관로를 제외한 P8 관로가 간접고립지역에 해당하는 관로이다. Fig. 5는 직접고립지역 및 간접고립지역의 탐색결과를 나타낸 그림이다.

3. 최적화 모형

본 연구에서는 유전자알고리즘(Genetic Algorithm. GA)을 이용하여 밸브위치 최적화를 수행하였다. 최적화 모형을 구성하기 위해서는 결정변수(Decision Variable)와 목적함수(Objective Function)를 설정하여야 한다. 먼저, 결정변수의 경우 밸브의 설치 위치이므로 밸브 설치가 가능한 모든 관로의 양단이 결정변수가 되고, 해당 위치에 밸브가 설치되는 경우 "1"을 부여하고, 설치되지 않는 경우 "0"의 값을 부여한다. 다음으로 목적함수의 경우, 본 연구에서는 두 개의 목적함수를 구성하였다. 첫 번째는 단일 관로 파손에 따른 단수용량 최소화이고, 두 번째는 밸브설치 비용의 최소화이다. 다음은 각각 관 파손에 따른 단수용량 산정방법과 밸브설치비용 산정방법을 설명하였다.

3.1 단수용량 산정

관 파손시 현실적인 단수용량의 산정을 위해서는 밸브설치 위치에 따른 직, 간접고립지역을 모두 고려할 필요가 있다. Eq. (1)은 단일 관로 파손시 단수용량을 계산하기 위한 식이며, 각 절점의 요구수요량과 각 절점에 연결된 관로 중 용수공급이 차단된 관로의 비율을 곱하여 산정한다.

$$Q_{suspend} = \sum_{i=1}^{n}\left(D_i \times \frac{NIP_i}{NP_i}\right) \quad (1)$$

여기서, $Q_{suspend}$는 단수용량(Suspended flow), n은 시스템 내 절점의 수, D_i는 i 절점의 요구수요량(Demand), NP_i는 i 절점과 직접적으로 연결된 모든 관로의 수(Number of Pipe), NIP_i는 i 절점과 연결된 관로 중 직, 간접고립지역에 속한 관로의 개수(Number of Isolated Pipe)이다.

총 단수용량을 계산하기 위해서는 설정된 밸브 위치에서 시스템 내 모든 관로를 순차적으로 하나씩 파손한 후, 이때 발생하는 직, 간접고립지역을 탐색하고, Eq. (1)을 이용하여 탐색된 고립지역 내 단수용량을 계산한 다음, 모든 관로의 경우를 합산하여 산정한다. 이와 같은 방법으로 상수관망시스템 내에 발생할 수 있는 모든 단일 관로 파손 상황을 고려한 총 단수용량을 계산하고, 이를 목적함수로 사용한다.

3.2 밸브 건설비용 산정

밸브 건설비용을 산정하기 위해, 상수관망에서 용수의 흐름을 차단하는 기능의 제수밸브(Isolation valve)를 고려하였다. 밸브 건설비용은 국내 상수도 개략공사비를 참고하였으며, 자재비와 설치비를 고려하였다. Eq. (2)는 최적화 모형에 적용하기 위해 본 연구에서 유도한 2차원 회귀식이며(상관계수: 0.99), 밸브의 직경은 밸브가 설치된 관로의 직경으로 가정하였다.

$$Cost_{valve} = 5.14D^2 + 4{,}891D + 726{,}999 \quad (2)$$

여기서, $Cost_{valve}$는 밸브의 설치비용(KRW)이고, D는 밸브가 설치될 관로의 직경(mm)이다. 총 밸브 설치비용은 시스템 내 설치된 각 밸브의 설치비용을 합산하여 산정하였다.

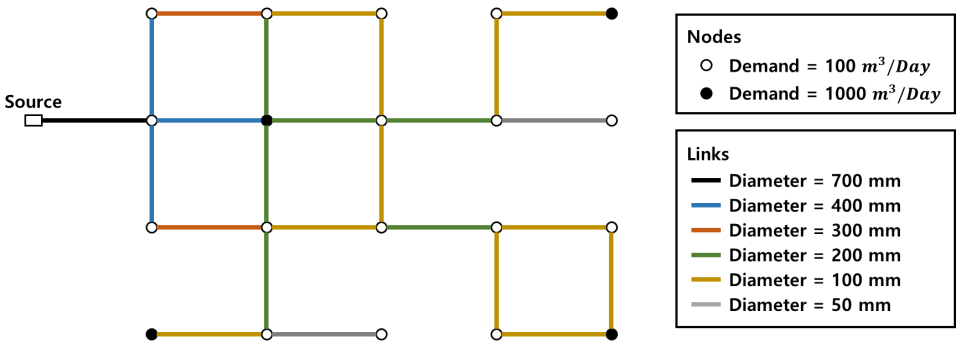


Fig. 6. Application network

4. 최적화 모형의 적용 및 결과

Fig. 6은 적용대상 관망을 나타낸 그림으로, 1개의 수원과 20개의 절점, 25개의 관로로 이루어져 있다. 모든 절점의 수요량은 100 m^3/day로 동일하지만, 검은색으로 표시된 4개의 절점은 용수 사용량이 많은 대규모 수요처(예, 병원, 학교, 공공건물 등)를 나타내며, 해당 절점의 수요량은 1,000 m^3/day로 가정하였다.

4.1 단목적 최적화 수행결과(Single-Objective Genetic Algorithm, SOGA)

단수용량의 최소화를 단일목적함수로 적용하는 SOGA의 경우, 밸브 설치 개수를 고정한 상황에서, 밸브 설치비용은 고려하지 않고, 단수용량이 최소화가 되도록 밸브의 설치 위치를 결정한다. 참고로, 적용 네트워크의 경우 밸브 설치가 가능한 위치는 총 50곳(25개 관로 양단에 모두 설치할 경우)이다. Table 1은 밸브를 각각 10, 17, 24개 설치하는 경우 최적화를 통해 계산된 최소 단수용량을 나타내고 있으며 설치 밸브의 개수가 증가함에 따라 단수용량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 7은 각각 밸브 설치 개수가 10, 17, 24개인 경우의 최적 밸브 설치 위치를 도시한 그림이다. 해당 그림들을 통해 중요도가 높은 절점(즉, 용수 사용량이 높은 절점)이 간접고립지역으로 포함되는 것을 최대한 방지하기 위해 밸브 위치가 선정되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 요구 수요량이 높은 절점이 의도치 않은 단수 상황에 처하지 않도록 밸브를 설치함으로써 상수관망 전체의 용수공급 안정도를 높일 수 있도록 하였다. 또한, 흥미로운 분석결과는, 여러 번의 최적화 수행결과 밸브 설치 개수와 상관없이 공통적으로 선택되는 위치를 확인할 수 있으며, 이러한 지점에 밸브를 우선적으로 설치할 경우, 관 파손시 효과적으로 단수구역 및 단수용량을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Results of SOGA

No. of Valve Installed (EA)	Suspended flow rate (m^3/day)
10	24,492
17	16,097
24	11,425

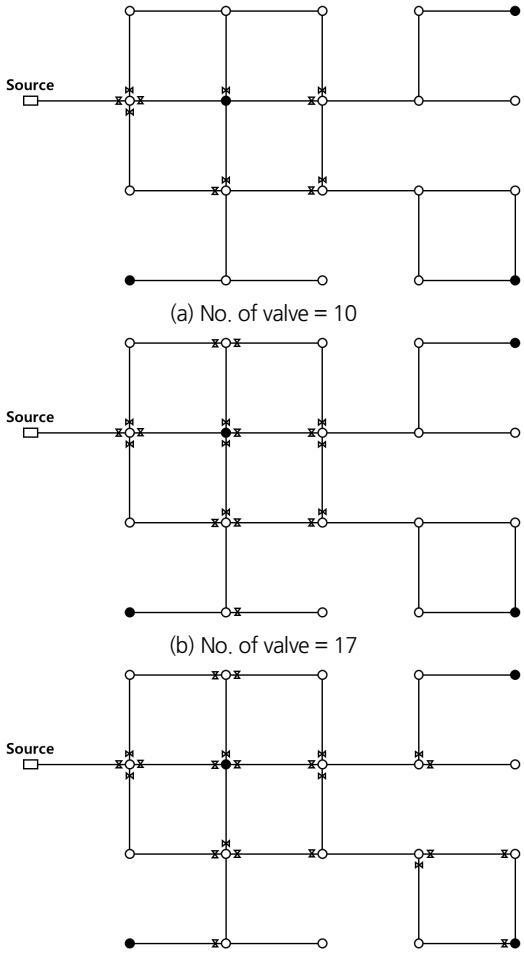


Fig. 7. Optimal valve placement results from SOGA

4.2 다목적 최적화 수행결과(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA (NSGA-II))

다목적 최적화의 경우, 단수용량 최소화와 밸브 설치비용 최소화를 동시에 목적함수로 설정하여 밸브 설치 최적화를 수행하였으며, MOGA (NSGA-II)를 적용하였다. Fig. 8은 다목적 최적화의 결과로 구해진 50개의 Pareto 해(Pareto Optimal Solution)를 나타내며, 50개의 최적해를 특성에 따라 4개의 그룹으로 구분하여 표시하였다. 그래프의 X축은 단수용량, Y축은 밸브 설치비용을 나타내며, 단위가 다른 두 목적함수 값을 비교하기 위해 계산된 단수용량과 밸브 설치비용을 각각 최대 발생가능한 값으로 나누어 0에서 1 사이의 값으로 표준화하여 도시하였다. 예상대로 밸브 설치비용이 증가함에 따라 단수용량이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 4개의 그룹별 특징을 정리하면 다음과 같다.

1) Group 1

밸브 설치비용이 가장 큰 구간으로 설치비용의 증가에 비해 단수용량 감소가 가장 낮은 구간으로, 밸브가 24개 이상 설치

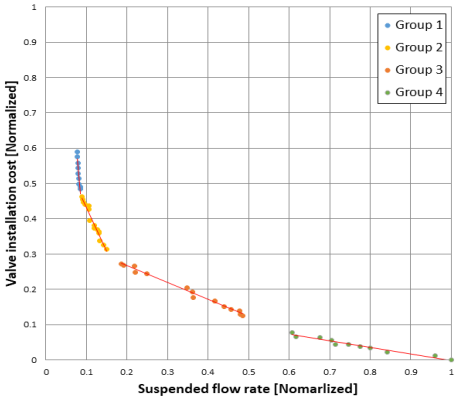


Fig. 8. Pareto optimal solutions from MOGA

된 해들이 이 구간에 속한다. 설치된 밸브의 개수가 충분하고 단수용량이 가장 적은 구간으로, 일정 개수 이상의 밸브가 설치되는 경우 단수용량의 감소효과가 저감되는 것을 알 수 있다.

2) Group 2

Group 1과 비교하여 상대적으로 밸브 설치비용 증가에 따른 단수용량 저감효과가 개선되었으며, 설치된 밸브개수가 13 ~ 23개에 해당하는 해들이 포함된다.

3) Group 3

설치된 밸브의 수가 7 ~ 12개에 해당하는 해들이 속해 있는 구간이며, 밸브 설치비용 증가에 따른 단수용량 저감 효과가 확연히 나타나는 구간이다.

4) Group 4

밸브 설치비용의 증가에 따른 단수용량 감소 비율이 가장 큰 구간이지만, 설치된 밸브의 수가 적어서 단수용량이 높아 용수공급 신뢰도가 가장 낮은 구간이다.

요약하면, Group 1은 밸브의 추가 설치에 따른 효과가 가장 낮은 구간이며, Group 4는 밸브 추가 설치에 따른 효과는 가장 높지만 단수용량이 높아 신뢰도가 가장 낮은 구간이다. 비교적 많은 예산이 가용한 경우, Group 2에 속한 해를 선택하거나, 보다 경제적으로 밸브 위치를 결정할 경우 Group 3에 속한 해를 선택하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

Table 2는 탐색된 50개의 Pareto 해에 대하여 각각 설치된 밸브의 개수와 밸브 설치비용, 단일 관로 파손에 의한 단수용량을 정리하였다. 또한, Fig. 8에 표시한 바와 같이 각 Pareto 해와 원점(Origin, Ideal Point)과의 거리를 함께 정리하였다. 참고로 50개의 해를 밸브 설치비용을 기준으로 오름차순으로 정리하였다. Fig. 9는 각각의 Pareto 해의 밸브 설치비용과

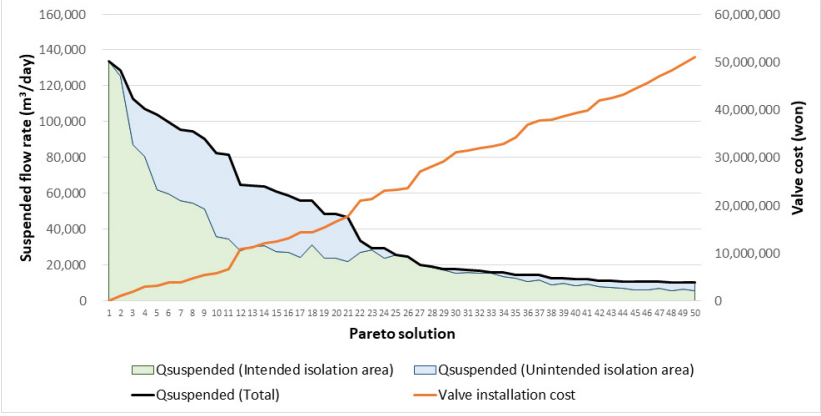


Fig. 9. Suspended flow rate vs. Valve cost of pareto solutions

Table 2. Summary of pareto optimal solutions from MOGA

		No. of valve installed	Valve Cost (KRW)	Suspended flow rate (m^3/day)	Dist. from Origin
Pareto Solution	1	0	0	133,800	1.00
	2	1	984,403	128,358	0.96
	3	1	1,910,795	112,592	0.84
	4	2	2,895,198	107,150	0.80
	5	2	3,178,298	103,708	0.78
	6	3	3,802,509	99,817	0.75
	7	2	3,821,590	95,592	0.72
	8	4	4,786,912	94,375	0.71
	9	4	5,430,204	90,333	0.68
	10	3	5,732,385	82,542	0.62
	11	4	6,716,788	81,350	0.61
	12	7	10,802,397	64,933	0.50
	13	8	11,143,508	64,233	0.50
	14	8	12,069,900	63,958	0.50
	15	9	12,411,011	61,108	0.48
	16	9	13,054,303	58,933	0.47
	17	10	14,321,806	55,808	0.45
	18	9	14,366,150	55,800	0.45
	19	9	15,292,543	48,533	0.40
	20	10	16,560,046	48,375	0.41
	21	11	17,621,973	46,442	0.40
	22	10	21,036,526	33,325	0.35
	23	11	21,377,636	29,425	0.33
	24	12	23,005,764	29,300	0.34
	25	11	23,230,421	25,717	0.33
	26	12	23,571,532	24,908	0.33
	27	13	27,154,799	20,083	0.35
	28	14	28,139,202	18,892	0.35
	29	15	29,123,604	17,800	0.36
	30	16	31,034,399	17,533	0.38
	31	17	31,375,510	17,417	0.39
	32	17	31,941,711	16,858	0.39
	33	17	32,301,902	16,067	0.39
	34	18	32,926,113	15,933	0.40
	35	19	34,193,616	14,367	0.41
	36	20	36,850,491	14,283	0.44
	37	21	37,655,015	14,267	0.45
	38	22	37,996,125	12,783	0.45
	39	22	38,639,417	12,425	0.46
	40	23	39,263,628	12,150	0.46
	41	23	39,906,920	11,975	0.47
	42	24	41,920,503	11,425	0.49
	43	25	42,441,926	11,267	0.50
	44	25	43,085,218	10,875	0.51
	45	26	44,352,721	10,792	0.52
	46	27	45,620,224	10,633	0.53
	47	27	47,009,596	10,558	0.55
	48	28	48,277,099	10,475	0.56
	49	28	49,666,471	10,408	0.59
	50	29	50,933,974	10,325	0.59

단수용량을 동시에 나타낸 그림이며, 단수용량의 경우, 직·간접고립지역에서 발생하는 단수용량을 구분하여 표시하였다.

탐색된 50개의 Pareto 해 가운데 적용 네트워크에 가장 적합한 밸브설치 위치를 도출하기 위해 네 가지 평가기준을 설정하고, 점수를 부여하였다. 설정된 평가기준은 다음과 같다.

1) Pareto 그래프(Fig. 8)에서 원점(Origin)으로부터의 거리

원점은 단수용량과 밸브 설치비용이 모두 0의 값을 가지는 가장 이상적인 위치이므로 원점과의 거리가 가까운 해에 높은 점수를 부여한다.

2) 밸브 설치비용 증가량 대비 단수용량 저감량의 기울기

추가 밸브 설치비용 대비 단수용량 저감량의 기울기가 클수록 밸브 설치비용 증가에 따른 단수용량 저감 효과가 큰 것으로 판단하여, 기울기가 큰 해에 높은 점수를 부여한다.

3) 전체 단수용량 중 간접고립지역에 해당하는 단수용량의 비율

해당 값은 밸브 차폐로 인해 의도치 않게 발생하는 단수용량의 비율을 의미하며, 간접고립지역으로 인해 의도치 않게 발생하는 단수용량이 적을수록 용수공급 안정성이 높은 것으로 판단하여 비율이 낮은 해에 높은 점수를 부여한다.

4) 설치된 밸브 개수 대비 발생하는 단수구역의 개수

해당 값은 밸브 설치에 따른 상수관망의 블록화를 의미하므로 해당 값이 높은 해에 높은 점수를 부여한다.

참고로 평가 점수(Score)는 각 평가기준 별로 가장 우수한 해에 50점, 가장 미비한 해에 1점을 부여하였다. Fig. 10은 각 평가 기준에 따라 50개의 Pareto 해에 점수를 부여하여 합산한 결과를 나타낸 그래프이며, 전체 평가결과 25번째 Pareto 해(11개 밸브 설치, 밸브 설치비용: 23,230,421원, 단수용량: 25,717 m^3/day)가 가장 우수한 결과를 나타낸다.

4.3 SOGA와 MOGA 결과 비교

단수용량 최소화를 목적함수로 최적화를 수행한 SOGA의 탐색 결과와 단수용량과 밸브 설치비용 최소화를 동시에 목적함수로 설정한 MOGA의 최적화 결과를 비교하였다. Table 3에는 밸브 설치 개수가 각각 10, 17, 24개인 SOGA와 MOGA의 최적화 결과를 비교하였다. SOGA의 경우, 정해진 밸브 설치 개수에 따라 하나의 해만 탐색되는 반면, MOGA의 경우에는 여러 개의 Pareto 해가 탐색될 수 있다. 비교결과, 대체적으

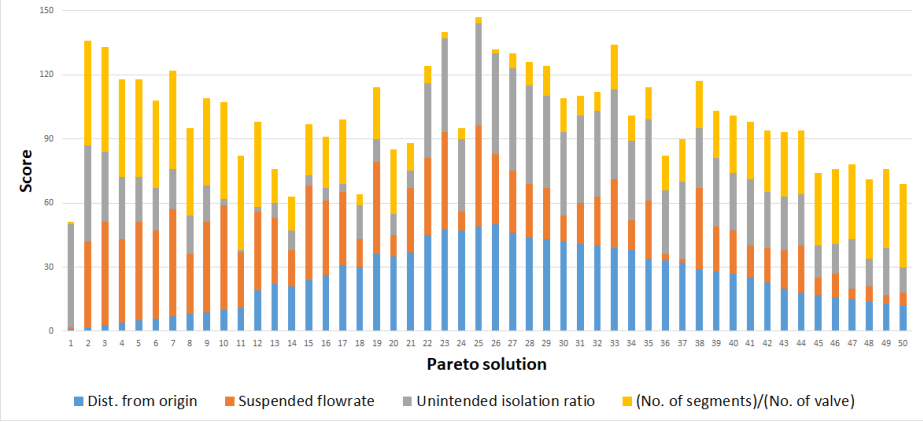


Fig. 10. Total evaluation score of individual pareto solutions

Table 3. Results comparison between SOGA and MOGA

Number of Valve (EA)	SOGA		MOGA	
	Suspended flow rate (m^3/day)	Valve cost (KRW)	Suspended flow rate (m^3/day)	Valve cost (KRW)
10	24,492	22,708,998	33,325	21,036,526
			48,375	16,560,046
			55,808	14,321,806
17	16,067	32,301,902	16,067	32,301,902
			16,858	31,914,711
			17,417	31,375,510
24	11,425	41,920,503	11,425	41,920,503

로 단수용량 최소화를 목적함수로 설정한 SOGA의 해가 단수용량과 밸브 설치비용 최소화를 동시에 목적함수로 설정한 MOGA의 해에 비해 동일한 수의 밸브가 설치된 경우, 단수용량은 낮은 반면 밸브 설치비용은 높은 것을 알 수 있으며, 이는 SOGA의 경우 밸브 설치비용에 대한 고려 없이 단수용량을 최대한 줄일 수 있도록 밸브 위치를 선택하기 때문이다. 또한, 17, 24개의 밸브를 설치하는 경우에는 SOGA 최적 결과가 MOGA의 Pareto 해에 포함되는 것을 알 수 있다. 따라서, 경제성과 공급안정성을 동시에 고려할 수 있는 다목적 최적화 모형이 보다 다양한 설계안을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 상수관망시스템 내 적정 밸브위치를 선정하기 위한 최적화 모형을 개발하고 적용하였다. 관 파손 시 밸브 차폐에 의한 정확한 단수용량 산정을 위해 단수지역을 직접고립지역과 간접고립지역으로 구분하였으며, 기존 간접고립지역 탐색 방법의 문제점을 개선한 새로운 간접고립지역 탐색 알고리즘을 제안하였다. 단수용량 최소화를 목적함수로 설정한 단목적 최적화(SOGA)와 단수용량과 함께 밸브 설치비용을 동시에 고려한 다목적 최적화(MOGA)를 각각 수행하여 그 결과를 비교, 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 정확한 단수구역 및 단수용량 계산을 위해서는 직, 간접고립지역을 모두 탐색해야 하며, 본 연구에서는 개선된 간접고립지역 탐색 알고리즘을 제시하였다.
2) 단목적 최적화(SOGA)의 수행결과, 용수사용량이 높은 절점이 간접고립지역으로 포함되는 경우를 최대한 줄일 수 있도록 밸브를 설치하는 것이 관로 파손 시 용수공급 안정성을 높일 수 있는 것으로 분석되었다.
3) 밸브의 설치 개수를 달리하여 SOGA를 수행한 결과, 높은 빈도로 밸브가 설치되는 지점이 존재하는 것을 확인하였으며, 이러한 지점에 우선적으로 밸브를 설치하는 것이 용수공급의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.
4) 다목적 최적화(MOGA)의 수행결과, 다수의 Pareto 해를 구할 수 있었으며 이들을 특성에 따라 4개의 그룹으로 구분하였다. 설계자의 요구에 맞는 적정해를 선정하기 위해서는 각 그룹에 포함된 해들의 특성을 분석할 필요가 있으며, 그룹 분석을 통해 적정 밸브 설치 개수의 범위를 결정하는데 활용할 수 있다.
5) MOGA를 통해 도출된 Pareto 해를 4가지 평가기준을 적용하여 점수를 산정하였다. 평가기준은 Pareto front상 원점으로부터의 거리, 밸브설치비용 증가에 따른 단수용량의 감소 비율, 전체 단수용량에서 간접고립지역이 차지하는 비율, 설치된 밸브 개수 대비 단위구역의 개수 등을 적용

하였다. 이처럼 설계자의 요구에 적합한 평가 기준을 설정한 후 점수를 부여함으로써 도출된 다양한 해로부터 최적 밸브위치를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

6) 다양한 목적함수를 동시에 고려할 수 있는 다목적 최적화 모형이 단목적 최적화 모형에 비해 보다 다양한 설계안을 제시할 수 있어 효과적일 것으로 판단되며, 본 연구에서 고려한 단수용량과 밸브 설치비용 외에 다양한 목적함수를 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1) 2017년도 정부(미래창조과학부)의 한국연구재단 첨단사이언스 · 교육허브개발사업의 지원(NRF-2017M3C1A6075016)과 2) 2016년도 미래창조과학부/한국연구재단의 지원(NRF-2016R1A2B4014273)으로 수행된 연구입니다. 이에 감사드립니다.

References

Alvisi, S., and Franchini, M. (2014). “A Heuristic procedure for the automatic creation of district metered areas in water distribution systems.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 133, No. 2, pp. 145-155.

Alvisi S., Creaco, E., and Franchini, M. (2011). “Segment identification in water distribution systems.” *Urban Water Journal*, Vol. 8, No. 4, pp. 203-217.

Choi, Y., Lee, H., Jung, D., and Kim, J. (2017). “Developmant of partitioning technique for improving water distribution system resilience.” *KSCE 2017 CONVENTION*, 2017.10, pp. 172-173.

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.

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.

Hernandez, E., and Ormsbee, L. E. (2018). “Application of segment based robustness assessment for water distribution networks.” *WDSA/CCWO Joint Conferernce 2018*, Vol. 1, No. 031.

Jun, H. (2005). “Isolating subsystems by valves in a water distribution system and evaluating the system performance.” *Journal of Korea Water Resources Association*, 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*, 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. 145-455.

Kim, S., Jun, H., Baek, C., Kim, K., and Yoo, D. (2007). “Proposing a technique for improvement of water distribution system reliability.” *KSWW and KSWE Association Conference*, 2007 (0), pp. 1-6.

Li, P., and Kao, J. J. (2008). “Segment-based vulnerability analysis system for a water distribution network.” *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 41-58.

Mahmoud, H., Kapelan, Z., and Savic, D. (2017). “Segment identification in water distribution systems by using network topological matrices.” *Conference CCWI 2017-Computing and Control for the Water industry*, Vol. 15.

Walski, T. M. (1993). “Water distribution valve topology for reliability analysis.” *Reliability engineering & system safety*, Vol. 42, No. 1, pp. 21-27.

Yoo, D., Kim, K., Park, M., and Joo, J. (2017). “Multi-objective optimal design for improving water supply serviceability considering segments in water distribution networks.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 2, pp. 29-37.