

상수관망의 부분적 차폐를 위해 필요한 제수밸브 결정 알고리즘

An Algorithm for Searching On-Off Valves to Isolate a Subsystem in a Water Distribution System

전환돈, 박무종*, 이종석**

한밭대학교, 한서대학교*, 한밭대학교**

Jun hwan-don, Park moo-jong*, Lee jong-seok**

Hanbat National Univ., Hanseo Univ.*,

Hanbat National Univ.**

요약

상수관망의 유지보수와 파괴부분의 수리를 위해서 상수관망의 일부분을 차폐할 경우가 자주 발생한다. 상수관망의 노후화로 인하여 이와 같은 부분차폐의 필요성은 증대되고 있다. 상수관망의 부분적인 차폐는 설치된 제수밸브를 닫아야 한다. 그러나 상수관망에 설치된 제수밸브의 위치와 개수를 미리 파악하여 대처하는 것이 추가적인 피해를 방지하는데 필수적이다. 본 연구에서는 차폐하고자하는 상수관망의 위치에 따라서 필요한 제수밸브를 결정하기 위하여 세가지 matrix에 기반을 둔 알고리즘을 개발하였다. 세가지 matrix는 상수관망의 network topology를 반영하는 node-arc matrix, 제수밸브의 위치정보를 담고 있는 valve location matrix, 그리고 제수밸브가 설치되지 않은 위치정보를 담고 있는 valve deficiency matrix로 구성된다. 개발된 제수밸브 결정 알고리즘을 캐나다 오타와시의 상수관망에 적용하여 이의 적용성과 효율성을 검증하였다.

Abstract

Concerns related to protecting, identifying, and isolating of subsystems of a water distribution network have led to the realization of the increased importance of valves in the system. The most important purpose of valves in water distribution systems is to isolate subsystems due to breakage, maintenance activities, or contamination. A subsystem called segment is isolated by the closure of adjacent valves and an efficient algorithm should identify the adjacent valves to minimize the pipe failure impact. In this paper, an algorithm to identify adjacent valves to be closed to isolate a subsystem from the remainder of a network in case of a pipe failure is presented. An application to the water distribution system in Ottawa, Canada demonstrates the developed algorithm efficiently locates the adjacent valves for the isolation of a broken pipe.

I. 서론

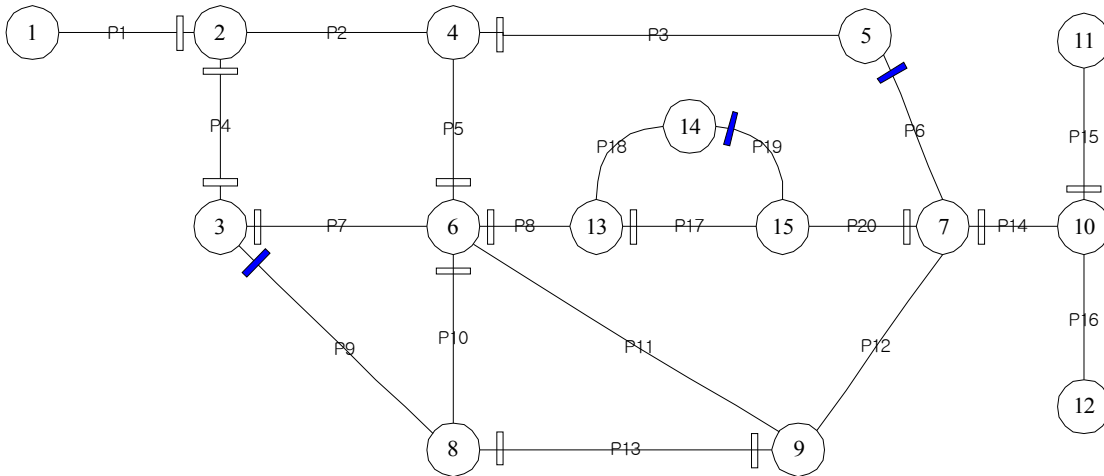
최근 상수관망의 보호, 취약지점 확인, 부분적 차폐가 중요한 문제로 대두되면서 상수관망에 설치된 밸브의 중요성이 부각되고 있다. 이중 제수밸브(on-off valve)에 의한 상수관망의 부분적 격리는 오염물이 상수관내로 투입되었을 경우와 상수관망의 유지관리를 위한 관 내벽 검사등의 유지관리를 위해 특정 상수관에 잠정적으로 물 흐름을 격리하기 위해 필요하다. 이때 제수밸브의 역할은 상수관망에서 상수관 파괴나 유지관리 작업의 대상이 되는 특정 관을 상수관망의 다른 부분과 격리 하는 것이며, 본 연구에서 제안된 알고리즘은 어떤 위치에 몇 개의 제수밸브를 닫아야 하는지를 결정하여 준다.

상수관망에서 상수관의 파괴는 피할 수 없는 현상이므로 상수관 파괴시 발생하는 피해를 최소화하는 일 또한 매우 중요하다 할 수 있다. 피해의 최소화를 위해서는 상수관망을 계획하는 단계와 운영 단계로 나뉘어서 행해질 수 있다. 상수관망의 계획단계에서는 제수밸브의 적절한 수와 위치를 결정하여 효율적인 배치가 이루어지도록 하여야 하며, 운영단계에서

는 상수관 파괴될 경우 신속하게 제수밸브를 찾아내어 해당 부분을 격리, 파괴된 상수관을 신속하게 수리 또는 교체하여 누수시간을 최소화하는 것으로 피해를 줄일 수 있다.

상수관망에 있어서 밸브의 역할은 최초로 Bouchart와 Goulter (1991)에 의해서 연구되었으며 관 파괴시 물손실 최소화 가능한 밸브배치를 결정하는 모델을 제안하였다. Walski (1993)는 실제적인 밸브와 상수관망의 부분적 격리를 분석하기 위하여 "segment" 개념을 제안 하였으며, 이경훈 등 (2001)이 제안한 밸브 탐색 알고리즘에 관한 연구에서는 Breadth-First search를 적용하여 상수관 파괴시 해당 관과 함께 격리되는 주변 관들(segment)을 밝히고 이에 따른 제수밸브의 위치와 개수를 구하였다.

본 연구에서는 이경훈 등에서 사용된 Breadth-First search 알고리즘이 아닌 valve location matrix를 사용하여 제수밸브를 찾아내는 알고리즘을 개발하였다. 제안된 제수밸브 탐색 알고리즘을 적용하기 위해서는 제수밸브의 위치를 고려하여 파괴된 관과 함께 격리되는 주변 관들을 찾아내어야 하므로 Jun



▶▶ 그림 1. Sample network

(2005)에서 제안된 segment 정의 알고리즘을 이용하여 이러한 주변 관들을 찾아내었다.

"1", 없으면 "0"으로 표시된다 (Table 2 참조).

II. 본론

1. 기본 Matrix

알고리즘은 두 개의 기본 매트릭스, 즉 Node-Arc matrix와 Valve Location matrix를 바탕으로 Valve Deficiency matrix로 구성된다. 세 개의 matrix와 segment 정의 알고리즘의 설명을 위하여 그림 1의 상수관망을 예로 하겠다. 그림 1의 상수관망에서 수원은 Node 1 과 Node 12에 위치한다고 가정한다.

- Node-Arc matrix :

Node-Arc matrix는 기본적인 상수관망의 구조와 절점과 관 사이의 관계를 나타낸다. 행은 절점을 나타내며 관은 열로 표현되고 절점과 관이 연결 되어있어 절점이 관의 끝점이 되면 "1"의 값을 갖으며, 아닌 경우 "0"의 값을 갖는다 (Table 1 참조).

[표 1] Node-Arc matrix의 예

절점 \ 관	P2	P4
2	1	1
3	0	1
4	1	0

- Valve Location matrix :

Valve location matrix는 상수관망에 분포되어 있는 밸브의 위치를 나타내며, Node-Arc matrix 와 같은 구조를 갖는다. 하나의 관과 그 관의 한 절점 가까이 밸브가 설치되어 있으면

[표 2] Valve Location matrix의 예

절점 \ 관	P2	P4
2	0	1
3	0	1
4	0	0

- Valve Deficiency matrix :

Valve Deficiency matrix는 상수관망에서 밸브가 설치되어 있지 않은 지점을 나타내며 다음 식 (1)과 같이 Node-Arc matrix 와 Valve location matrix의 산술적 차이로 구해진다. Table 3에서, 굵은 글씨로 나타난 "0"는 해당 위치에 밸브가 설치되어 있음을 의미한다.

$$\text{Valve Deficiency matrix} = (\text{Node-Arc matrix}) - (\text{Valve location matrix}) \quad (1)$$

[표 3] Valve Deficiency matrix의 예

절점 \ 관	P2	P4
2	1	0
3	0	0
4	1	0

2. 제수밸브 탐색 알고리즘

제안된 제수밸브 탐색 알고리즘의 예를 보여주기 위해서 P6의 파괴로 인해 발생하는 segment를 예로 하겠다. P6의 파괴에 의해서 발생하는 segment는 관 (P6, P12, P11, P7)로 이루어지며 이들 네 관의 절점은 다음과 같다 (Table 4 참조).

[표 4] P6의 파괴에 따른 segment

관 \ 절점	절점 1	절점 2
P6	N5	N7
P12	N7	N9
P11	N9	N6
P7	N6	N3

네 개의 관을 순차적으로 탐색하며 P6부터 제수밸브 탐색을 시작하며 각 밸브의 구분을 위해 V(절점, 관)으로 나타낸다.

Step 1: P6의 두 개의 절점은 N5와 N7이므로 두 절점의 Row와 P6 column으로 정의 되는 Cell의 값을 찾는다. 먼저, Cell(N5, P6) 값은 "1" 이므로 이 제수밸브만 닫히는 제수밸브로 선정한다.

$$\text{제수밸브}=\{V(N5, P6)\}$$

Step 2: 다음 절점은 N7이며, (N7, P6) Cell 값은 "0" 이므로, 즉 P6를 바로 격리할 수 있는 제수밸브가 절점 N7 옆에, P6상에 설치되어 있지 않으므로 절점 N7 주위의 모든 제수밸브를 닫아야 한다. 따라서 절점 N7 Row내의 모든 제수밸브가 닫혀야 하는 제수밸브이다. N7 Row 존재하는 두 개의 밸브 [V(N7, P14), V(N7, P20)]가 제수밸브로 선정된다.

$$\text{제수밸브}=\{V(N5, P6), V(N7, P14), V(N7, P20)\}$$

Step 3: P6의 검색이 끝났으므로 다음 관인 P12를 탐색한다. P12의 두 절점은 N7과 N9이나 N7은 이미 탐색이 끝났으므로 (Step 2에서) Cell(N9, P12) 값을 검색하며 "0" 이므로 N9 Row내의 모든 제수밸브를 닫혀야 하는 제수밸브로 선정한다. 이때 절점 N9주위에 설치된 제수밸브는 V(N9, P13) 한 개 이므로 이 V(N9, P13)를 닫혀야하는 제수밸브로 선정된다.

$$\text{제수밸브}=\{V(N5, P6), V(N7, P14), V(N7, P20), V(N9, P13)\}$$

Step 4: P11의 경우 N9과 N6이며 N9은 검색이 끝났으므로 N6를 검색한다. Cell(N6, P11) 값은 "0"이므로 N6 Row의 모든 밸브를 닫혀야 하는 제수밸브로 선정한다.

$$\text{제수밸브}=\{V(N5, P6), V(N7, P14), V(N7, P20), V(N9, P13), V(N6, P5), V(N6, P8), V(N6, P10)\}$$

Step 5: P7의 경우 N6와 N3가 절점이나 N6는 Step 4에서

검색을 마쳤으므로 N3를 검색하며

Cell(N3, P7) 값이 "1" 이므로 이 밸브만 닫혀야 하는 제수밸브로 선정한다.

$$\text{제수밸브}=\{V(N5, P6), V(N7, P14), V(N7, P20), V(N9, P13), V(N6, P5), V(N6, P8), V(N6, P10), V(N3, P7)\}$$

Step 6: Segment 내 모든 관의 검색이 끝났으므로 최종적으로 탐색된 제수밸브는 Step 5의 제수밸브와 같다.

위 과정을 반복하여 적용하면 상수관망내 존재하는 segment별로 격리되어야 하는 제수밸브를 탐색할 수 있다.

3. 제안된 제수밸브 탐색 알고리즘의 실제 상수관망에 적용

제안된 제수밸브 탐색 알고리즘의 실제 상수관망에 적용하여 제안된 알고리즘의 효율성을 검증하였다. 선정된 실제 상수관망은 미국의 Chester시에 설치되어 있는 상수관망이며 전체관망은 세 개의 구획으로 나뉘어져 있고 이 중에서 한 구획 (그림 2에 표시)을 선정하여 제수밸브 탐색 알고리즘을 적용하였다. 수원으로는 한 개의 저수지와

탱크가 있고 저수지는 상수관망의 북서쪽에 위치하고 사각형으로 표시되어 있으며 탱크는 중앙에 위치하며 십자형으로 표시되어 있다. 상수관의 개수는 1,816개이며 1,720개의 제수밸브, 1,414개의 용수절점으로 이루어져 있다. 상수관망의 전체 연장은 약 270km이다. 상수관의 최소 관경은 152mm이며 최대 직경은 2516.6mm이다.

제안된 제수밸브 알고리즘의 적용을 위하여 필요한 자료는 다음과 같다.

- EPANET input file
- 밸브위치 정보 : CAD file 또는 Shape file

이중 밸브위치 정보는 해당 상수관망인 경우 Shape file 형태로 저장되어 있으며 이를 이용하여 valve location matrix를 구성하였다. Segment 정의 알고리즘의 적용 결과 1,081의 segment가 정의 되었으며 제안된 제수밸브탐색 알고리즘을 적용하여 각 segment별로 제수밸브의 리스트와 개수를 구하였다. 전체 segment를 구하고 각 segment별로 제수밸브를 구하는데 약 5분이 소요되었다.

제수밸브 개수별 segment의 수는 Table 6에 나타내었다. 약 80%의 segment가 제수밸브 2개 내지는 3개로 격리가 가능하였으나 7개 이상의 제수밸브가 필요한 segment는 3개가 있었다.

[표 5] 제수밸브의 수에 따른 segment의 분포

제수밸브의 수	segment 수	Percentage
1	57	5.3%
2	437	40.4%
3	440	40.7%
4	107	9.9%
5	22	2.0%
6	12	1.1%
7	3	0.3%
7+	3	0.3%
총 수	1081	100%

Table 6에서 보여진 것과 같이 segment를 격리하기 위해서 많은 수의 제수밸브가 필요한 경우에 제수밸브의 수가 많아지면 segment의 격리가 불가능할 경우가 발생할 수 있다. 이것은 제수밸브 운영신뢰도가 100%가 아니어서 단 1개의 제수밸브라도 작동을 하지 않는 경우, 해당 segment는 격리되지 않으며 인접 상수관으로 상수관 파괴의 여파가 미치게 된다. 따라서, 이러한 segment가 발생될 경우 추가적인 제수밸브의 설치로 segment의 크기를 줄임으로서 상수관 파괴여파도 줄이고 segment 격리의 신뢰성도 증대시킬 수 있다. 제한된 제수밸브탐색 알고리즘을 설계단계에 이용하여 가설계된 상수관망에서 제수밸브의 설치분포를 미리 분석하여 많은 수의 제수밸브가 필요한 (위의 예와 같은) segment가 나타나는지를 확인하여 설계에 반영할 수 있을 것이다. 또한 기존의 상수관망에서 본 논문에서 제안된 분석을 통해 위와 같은 결과가 나

을 경우 제수밸브를 추가하거나 해당부분을 집중 관리하여 파괴가능성을 줄이는 유지보수방안을 수립할 수 있을 것이다. 즉 새로 건설되는 상수관망이나 기존에 이용하고 있는 상수관망을 개량하기 위해, 제안된 제수밸브 탐색 알고리즘이 효율적으로 사용될 수 있을 것이다.

III. 결 론

상수관망이 노후화 되면서 상수관 파괴현상이 자주 나타나게 되며 관 파괴에 의한 피해를 최소화하기 위하여 파괴된 관의 격리를 위한 제수밸브의 역할이 중요해 지고 있다. 관 파괴시 파괴된 관을 신속하게 격리하지 못하면 누수량에 의한 손실과 용수공급 중단에 따른 용수수요자의 피해가 커질 수 있으므로 이러한 피해를 최소화 하기위하여 필요한 제수밸브를 신속히 결정하여 파괴된 관을 격리하기 위한 제수밸브 탐색 알고리즘을 제안하였다.

간략하게 결론을 요약하면

- (1) 제수밸브를 결정하기 위하여 선행과정으로 제수밸브의 위치를 고려한 segment를 정의하는 알고리즘을 이용, 상수관망 전체 segment를 정의하였다.
- (2) 정의된 segment별로 각 segment의 격리를 위한 제수밸브를 효율적으로 탐색할 수 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 valve location matrix를 기반으로



▶▶ 그림 2. 적용대상 상수관망 (Ottawa, Canada)

있으므로 추가적인 자료가 필요없이 segment 탐색 알고리즘에서 사용된 valve location matrix를 이용하여 적용의 효율성을 높였다.

- (3) 제안된 알고리즘 및 segment 정의 알고리즘을 상수관망의 설계 단계와 운영단계에 적용하여 효율적인 설계 및 운영방안 수립에 사용될 수 있다. 설계단계에서 적절한 제수밸브의 위치와 개수 선정에 이용하여 대규모 segment가 발생하는 것을 방지할 수 있으며 기존 상수관망의 유지보수시 중요한 segment 및 제수밸브를 파악할 수 있으므로 그러한 segment 및 제수밸브를 집중 관리하여 파괴나 고장의 가능성을 줄임으로써 전체 상수관망의 신뢰성을 제고 할 수 있을 것이다. 직접적인 이용의 예로 실제 상수관망의 적용 예에서 볼 수 있듯이 특정 부분의 상수관망을 격리하기 위하여 많은 수의 제수밸브가 필요한 경우 이러한 지역에 추가적인 제수밸브를 설치하여 한 개의 관파괴로 인한 피해를 줄임으로써 전체적인 상수관망의 효율성을 증대 시키는 분석에도 사용될 수 있다.
- (4) 제안된 제수밸브 탐색 알고리즘의 적용성 및 효율성은 작은 규모의 가상적인 상수관망이 아닌 실제 도시유역에 설치된 큰 규모의 상수관망에 적용해 봄으로써 판명되었으며, 알고리즘의 적용에 필요한 자료를 가지고 있는 다른 상수관망에도 적용될 수 있음을 밝혔다.

■ 참고 문헌 ■

- [1] 이경훈, 오창주, 강용덕 (2001), "관망제어를 위한 밸브 탐색 알고리즘", 상하수도 학회지, 15권 3호, pp.222-228.
- [2] Bouchart, F. and Goulter, I. (1991). "Reliability improvements in design of water distribution networks recognizing valve location." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 12, pp.3029-3040.
- [3] Walski, T.M. (1993). "Practical aspects of providing reliability in water distribution systems." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 42, pp. 13-19.