

상수관망의 부분적 격리를 위한 제수밸브 탐색 알고리즘

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

전환돈^{1,*} · 김중훈²

Jun, Hwan Don^{1,*} · Kim, Joong Hoon²

1 고려대학교 공과대학 연구교수

2 고려대학교 사회환경시스템 공학과 교수

(2005년 7월 22일 논문 접수; 2006년 2월 6일 최종 수정논문 채택)

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 a subsystem due to breakage, maintenance activities, or contamination. A subsystem called segment is isolated by the closure of adjacent valves. Minimizing the pipe failure impact, an efficient algorithm is required to identify adjacent valves quickly. In this paper, an algorithm to identify adjacent valves to be closed to isolate a subsystem from the remainder of a network when a pipe failure is presented. The algorithm is operated on a matrix called the valve location matrix containing the information of valve locations. An application to an existing water distribution system demonstrates the developed algorithm efficiently locates the adjacent valves for the isolation of a broken pipe.

Key words: water distribution system, valves, subsystem isolation, valve search algorithm

주제어: 상수관망, 제수밸브, 부분적 격리, 밸브탐색 알고리즘

1. 서론

최근 상수관망의 보호, 취약지점 확인, 부분적 차폐가 중요한 문제로 대두되면서 상수관망에 설치된 밸브의 중요성이 부각되고 있다. 일반적으로 밸브는 두가지 목적으로 상수관망에 설치되며 이는 물 흐름

의 차단과 압력의 조절이라 할 수 있다. 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 상수

*Corresponding author Tel: 82-2-3290-3732, FAX: +82-2-928-1927, E-mail: hwandonjun@korea.ac.kr (Jun, H.D.)

관망의 다른 부분과 격리 하는 것이며, 본 연구에서 제안된 알고리즘은 어떤 위치에 몇 개의 제수밸브를 닫아야 하는지를 결정하여 준다.

일반적으로 상수관망의 부분적인 격리가 필요한 경우, 제수밸브의 위치에 따라 몇 개의 상수관이 함께 격리되는 것이 일반적이며 특히, 상수관 중 한 개가 파괴된 경우 파괴된 상수관 뿐만 아니라 추가로 몇 개의 상수관이 함께 격리되는 경우가 많이 발생한다. 이러한 현상은 제수밸브의 수와 위치가 부적절한 경우 자주 발생하며 더 많은 상수관이 격리되게 되면 물공급 중단 등의 피해영역 또한 증가한다. 상수관망에서 상수관의 파괴는 피할 수 없는 현상이므로 상수관의 적절한 유지관리로 상수관 파괴의 확률을 줄이는 것과 함께 상수관 파괴시 발생하는 피해를 최소화 하는 일 또한 매우 중요하다고 할 수 있다. 피해의 최소화를 위해서는 상수관망을 계획하는 단계와 운영 단계로 나누어서 행해질 수 있다. 상수관망의 계획 단계에서는 제수밸브의 적절한 수와 위치를 결정하여 효율적인 배치가 이루어지도록 하여야 하며, 운영 단계에서는 상수관 파괴될 경우 신속하게 제수밸브를 찾아내어 해당 부분을 격리, 파괴된 상수관을 신속하게 수리 또는 교체하여 누수시간을 최소화 하는 것으로 피해를 줄일 수 있다. 운영단계에서 제수 밸브를 신속하게 찾아내는 것과 함께 피해 영역을 최소화 할 수 있는 다른 하나의 방안은 각 밸브를 적절히 관리 하는 것이며 이는 각 밸브의 중요도, 즉 해당 밸브가 파괴될 때 예상되는 피해규모를 예측하여 피해규모를

기준으로 피해규모가 큰 밸브를 특별 관리하여 늘 최적의 운영 상태로 유지, 비상시에 정확하게 작동되도록 하는 것이며 이와 관련된 연구는 전환돈(2005)에 의해서 행해졌다. 본 연구에서는 신속히 제수 밸브를 찾기 위한 효율적인 알고리즘을 제안하여 누수시간 및 용수공급 중단 기간을 최소화하는 것을 목적으로 한다.

이러한 상수관망에 있어서 밸브의 역할은 최초로 Bouchart와 Goulter(1991)에 의해서 연구되었으며 관 파괴시 물손실 최소화가 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 제수 밸브의 위치와 개수를 구하였다.

본 연구에서는 이경훈 등에서 사용된 Breadth-First search 알고리즘(Ahuja, Magnanti, and Orlin(1993))이 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(2005)에서 제안된 segment 정의 알고리즘을 이용하여 이러한 주변 관들을 찾아내었다.

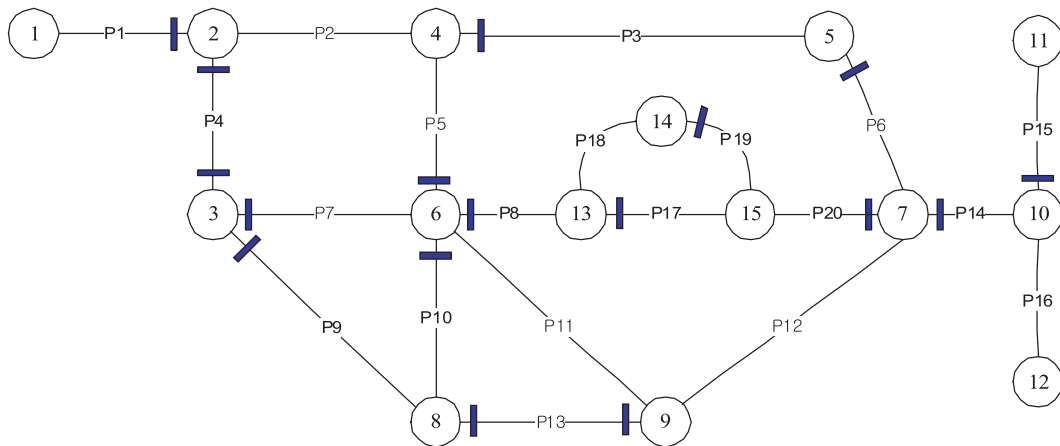


Fig. 1. Sample network.

2. Segment 정의 알고리즘 및 제수밸브 탐색 알고리즘

2.1. Segment 정의 알고리즘

전술한 바와 같이 segment 즉 파괴된 관을 포함하여 함께 격리되는 관들의 집합을 정의하는 알고리즘은 Jun(2005)에서 제안되었다. 이 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 Fig. 1의 상수관망예를 예로 하겠다. Fig. 1의 상수관망에서 수원은 Node 1과 Node 12에 위치한다고 가정한다.

2.1.1. Node-Arc matrix

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

2.1.2. Valve Location matrix

Valve location matrix는 상수관망에 분포되어 있는 밸브의 위치를 나타내며, Node-Arc matrix와 같은 구조를 갖는다. 하나의 관과 그 관의 한 절점 가까이 밸브가 설치되어 있으면 "1", 없으면 "0"으로 표시된다. 이 Valve location matrix는 제수밸브 탐색 알고리즘의 기본 matrix로 사용되며, segment 정의 알고리즘

Table 1. Node-Arc matrix의 예

절점 \ 관	P2	P4
2	1	1
3	0	1
4	1	0

Table 2. Valve Location matrix의 예

절점 \ 관	P2	P4
2	0	1
3	0	1
4	0	0

에 의해서 격리되는 관들을 구한 후 적용한다 (Table 2 참조).

2.1.3. Valve Deficiency matrix

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

Valve Deficiency matrix =

$$(Node-Arc matrix) - (Valve location matrix) \quad (1)$$

2.1.4. Segment 정의 알고리즘의 예: 관 P6 파괴에 의한 segment

Jun(2005)에 의해서 제안된 segment(subsystem) 정의 알고리즘은 위의 세 개의 matrix 중에서 Valve Deficiency matrix를 바탕으로 하여 segment에 포함된 관들과 절점을 정의한다. Valve Deficiency matrix에서 "1"의 의미는 해당 지점에 밸브가 없음을 의미하며 이를 이용하여 "1"을 찾아나가는 것으로 segment의 관과 절점을 정의한다. 먼저 파괴된 관에서 시작하여 "Column search"와 "Row search"를 번갈아서 수행하며 "Column search"로부터 절점을, "Row search"로 관을 정의한다. 알고리즘을 설명하기 위하여 관 P6 파괴를 예로 들었다. P6에서 "Column search"를 통해서 "1"을 찾으면 절점 N7에 "1"을 찾게 되었다. 절점 N7의 row에서 "1"을 찾게 되면 "Row search"를 시작하여 관 P12의 column에서 "1"을 만나게 되며, 다시 "Column search"를 실시하여 다른 "1"를 찾는다. 이를 반복하여 더 이상 "1"을 찾지 못하게 되면 segment내의 모든 절점과 관을 정의한 것이다. Fig. 2에서 이 과정이 설명되어 있으며 화살표의 진행순서는 segment 정의 알고리즘의 수행과정을 보여준다.

Table 3. Valve Deficiency matrix의 예

절점 \ 관	P2	P4
2	1	0
3	0	0
4	1	0

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
N1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N4	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
N8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
N10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
N11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
N12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
N13	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
N14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
N15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1

Fig. 2. P6 파괴에 의한 segment 정의 과정(절점 및 관).

이의 결과로 관 P6에 의해서 나타나는 segment를 이루는 절점과 관은 다음과 같다.

관 = {P6, P12, P11, P7}

절점 = {N7, N9, N6}

2.2. 제수밸브 탐색 알고리즘

본 논문에서 제안하는 제수밸브 탐색 알고리즘은 valve location matrix를 바탕으로 수행되며 전술한 바와 같이 이를 위해서는 선행과정으로 segment 정의 알고리즘을 수행하여 segment 내에 포함되는 관들을 찾아내야 한다. 각 관들은 두 개의 절점을 가지고 있으므로 valve location matrix에서 각 관별로 두 개의 "Cell"에 포함된 "1"의 유무에 따라 두 개 다른 과정으로 제수밸브를 탐색하게 된다. 이때 "Cell"의 위치는 엑셀 등 스프레드 시트에서 정의 되는 것과 같이 Column과 Row로 정의 된다. 즉, Column은 관으로 나타내지고 그 관의 두 절점이 Row를 나타내며 이를 예를 들어 설명하면 관 P6의 경우 두 절점이 N5와 N7이므로 Fig. 3에서 나타내진 것과 같이 두 "Cell"의 위치가 정의 된다(굵은 네모로 표시된 두 개의 "Cell", Fig. 3).

제수밸브 탐색의 두 가지 다른 과정은 정의된 "Cell"의 값이 "1" 혹은 "0"에 따라 달라진다. "1"인

경우 해당 제수밸브만이 segment 격리를 위해 닫혀야 하는 제수밸브로 선정되며 "0"인 경우는 해당 절점의 Row에 있는 모든 제수밸브가 segment 격리를 위해 닫혀야 하는 제수밸브로 선정된다. 이 과정을 관 P6가 파괴될 경우 나타나는 segment와 이를 격리하기 위한 제수밸브 선정과정을 예로 하여 설명하겠다. P6의 파괴로 인한 segment는 관 {P6, P12, P11, P7}로 이루어지며 이들 네 관의 절점은 다음과 같다(Table 4 참조).

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(Fig. 3 참조).

Table 4. P6 파괴로 인한 segment를 구성하는 네 개의 관과 절점

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

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
N1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N3	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N6	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
N8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
N9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
N10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
N11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N13	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
N14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
N15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 3. P6를 격리하기 위한 제수밸브 탐색의 예(절점 5와 절점 7).

$$\text{제수밸브} = \{V(N5, P6)\}$$

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(Fig. 4 참조). 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 N9 주위에 설치된 제수밸브는 V(N9, P13) 한 개이므로 이 V(N9, P13)를 닫혀야 하는 제수밸브로 선정된다.

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

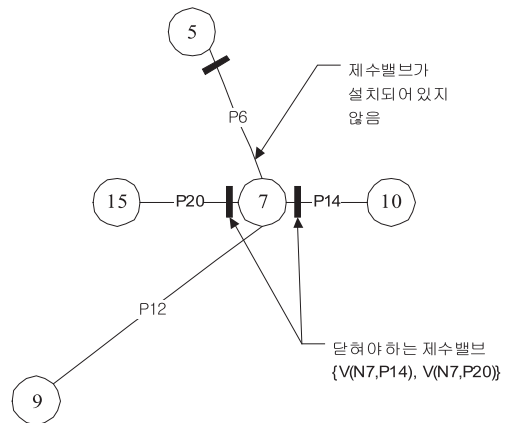


Fig. 4. 절점 N7 주위의 제수밸브.

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

Table 5. Sample network 내 segment 와 탐색된 제수밸브

파괴 관	Segment	Valve list
P1	S1 = {P1}	V(N2, P1)
P2	S2 = {P2, P5}	V(N2, P1), V(N4, P3), V(N2, P4), V(N6, P5)
P3	S4 = {P3}	V(N4, P3), V(N5, P6)
P4	S3 = {P4}	V(N2, P4), V(N7, P20)
P5	S2 = {P2, P5}	V(N2, P1), V(N4, P3), V(N2, P4), V(N6, P5)
P6	S5 = {P6, P12, P11, P7}	V(N5, P6), V(N3, P7), V(N6, P5), V(N7, P20), V(N6, P10), V(N6, P8), V(N9, P13), V(N7, P14)
P7	S5 = {P6, P12, P11, P7}	V(N5, P6), V(N3, P7), V(N6, P5), V(N7, P20), V(N6, P10), V(N6, P8), V(N9, P13), V(N7, P14)
P8	S6 = {P8, P18}	V(N6, P8), V(N13, P17), V(N14, P19)
P9	S8 = {P9, P10}	V(N3, P9), V(N6, P10), V(N8, P13)
P10	S8 = {P9, P10}	V(N3, P9), V(N6, P10), V(N8, P13)
P11	S5 = {P6, P12, P11, P7}	V(N5, P6), V(N3, P7), V(N6, P5), V(N7, P20), V(N6, P10), V(N6, P8), V(N9, P13), V(N7, P14)
P12	S5 = {P6, P12, P11, P7}	V(N5, P6), V(N3, P7), V(N6, P5), V(N7, P20), V(N6, P10), V(N6, P8), V(N9, P13), V(N7, P14)
P13	S7 = {P13}	V(N8, P13), V(N9, P13)
P14	S10 = {P14, P16}	V(N7, P14), V(N10, P15)
P15	S11 = {P15}	V(N10, P15)
P16	S10 = {P14, P16}	V(N7, P14), V(N10, P15)
P17	S9 = {P17, P19, P20}	V(N7, P20), V(N13, P17), V(N14, P19)
P18	S6 = {P8, P18}	V(N6, P8), V(N13, P17), V(N14, P19)
P19	S9 = {P17, P19, P20}	V(N7, P20), V(N13, P17), V(N14, P19)
P20	S9 = {P17, P19, P20}	V(N7, P20), V(N13, P17), V(N14, P19)

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 일반화 하여 흐름도로 표현하면 Fig. 5와 같으며 Fig. 1의 시험대상 관망에서 발생가능한 모든 segment와 각 segment별 제수밸브는 Table 5에 나타내었다.

3. 제안된 제수밸브 탐색 알고리즘의 실제 상수관망에 적용

제안된 제수밸브 탐색 알고리즘의 실제 상수관망에 적용하여 제안된 알고리즘의 효율성을 검증하였

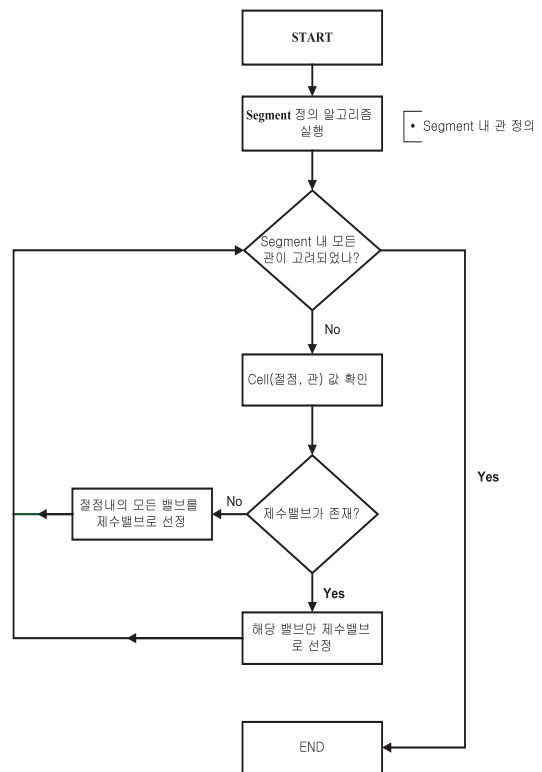


Fig. 5. 제수밸브 탐색 알고리즘 흐름도(Flow chart).

다. 선정된 실제 상수관망은 캐나다에 위치한 도시 중 하나에 설치되어 있는 상수관망이며 전체관망은 세 개의 구획으로 나뉘어져 있고 이 중에서 한 구획 (Fig. 6에 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

Table 6. 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%

location matrix를 구성하였다. 제안된 알고리즘은 Visual Basic으로 프로그램화 되었다.

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. 전체 segment와 제수밸브 탐색에 소요되는 시간은 상수관망의 크기에 따라 달라지며 작은 규모의



Fig. 6. 적용대상 관망의 관망형태, 절점(점), 저수지(사각), 및 탱크(십자).

Table 7. Segment와 제수밸브의 예

Segment	상수관	제수밸브
S(54)	11009, 11012, 11011, 11013, 11018, 17057, 14341, 14342, 14343, 17056, 14344, 14339, 14345, 14346, 11021, 14348, 14347, 17857, 17859, 15119, 17860, 17864, 17865, 17863, 17866, 17867, 17861, 17870, 17858, 17869, 15114, 17871, 17868, 17875, 17887, 17884, 17885, 17882, 17879, 17881, 17880, 17883, 17886, 17876, 17889, 17888, 17873, 17872, 17874, 17862, 15118, 15117, 14340,	(9636,11010): (9637,11010): (9637,11011): (14717,17866): (14713,17884): (14723,17878): (14725,17876): (12152,17056): (9637,11011): (9641,11018): (12152,17056): (9641,11021): (14717,17866): (12739,15114): (14713,17884): (14725,17876): (9274,15117):
S(78)	11904, 11905, 14551, 20867, 20866, 20864, 19508, 19507, 20865, 20870, 20868, 20869, 20871, 20885, 19315, 19317, 20874, 20873, 20876, 20884, 20722, 20721, 19797, 19798, 20883, 20877, 20878, 20872, 19318, 17504, 17501, 17499, 17500, 17508, 17507, 17513, 20881, 17502, 19319, 20194, 20181, 20183, 20182, 20184, 20185, 20186, 20879, 20882, 20875, 20880, 19799, 20723, 19316, 15138, 15139, 15142, 15146, 15153, 15143, 15144, 15148, 15141, 15145, 14798, 14799, 15150, 15147, 15155, 15149, 15154, 15151, 15152, 15140, 20064	(10292,14553): (10292,19506): (15816,19506): (14443,17497): (14443,17503): (14450,17505): (12758,15150): (12762,15147): (12764,15155): (10293,11904): (15817,19507): (9288,17507): (14452,17513): (16273,20182): (16275,20185): (12758,15150): (12762,15147): (12764,15155):

상수관망은 보다 짧은 시간에 전체 segment 정의 및 제수밸브 탐색이 완료된다. 예를 들어 100개 정도의 상수관으로 이루어진 상수관망의 경우 30초 미만에 모든 과정이 완료된다.

제수밸브 개수별 segment의 수는 Table 6에 나타내었다. 약 80%의 segment가 제수밸브 2개 내지는 3개로 격리가 가능하였으나 7개 이상의 제수밸브가 필요한 segment는 3개가 있었으며 이중 segment S(54)와 S(78)의 경우 각각 17개와 18개의 제수밸브가 필요하였다(Table 7 참조). Table 7에서 제수밸브는 전술한 바와 같이(절점, 관)의 형태로 정의되어 있다.

Table 7에서 보여진 것과 같이 특정 segment를 격리하기 위해서 많은 수의 제수밸브가 필요한 경우에 제수밸브의 수가 많아지면 segment의 격리가 불가능할 경우가 발생할 수 있다. 이것은 제수밸브 운영 신뢰도가 100%가 아니어서 단 1개의 제수밸브라도 작동을 하지 않는 경우, 해당 segment는 격리되지 않으며 인접 상수관으로 상수관 파괴의 여파가 미치게 된다. 따라서, 이러한 segment가 발생할 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 나올 경우 제수밸브를 추가하거나 해당 부분을 집중 관리하여 파괴가능성을 줄이는 유지보수 방안을 수립할 수 있을 것이다. 즉 새로 건설되는 상수관망이나 기존에 이용하고 있는 상수관망을 개량하기 위해, 제안된 제수밸브 탐색 알고리즘이 효율적으로 사용될 수 있을 것이다.

4. 결론

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 제안하

였다. 제안된 알고리즘은 valve location matrix를 기반하고 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.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호: R01-2004-000-10362-0)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이경훈, 오창주, 강용덕 (2001) 관망제어를 위한 밸브 탐색 알고리즘, *상하수도학회지*, **15**(3), pp. 222-228.
2. 전환돈 (2005) 상수관망에서의 밸브에 의한 관의 부분적 격리와 상수관망의 효율성 평가, *한국수자원학회지*, **38**(7), pp. 2005-07.
3. Ahuja, R.K., Magnanti, T.L., and Orlin, J.B. (1993), *Network Flows: Theory, Algorithm, and Applications*, ISBN 0-13-617549-X, Prentice Hall, Inc., New Jersey
4. Bouchart, F. and Goulter, I. (1991) Reliability improvements in design of water distribution networks recognizing valve location. *Water Resources Research*, **27**(12), pp. 3029-3040.
5. Jun, H., Loganathan, G.V., Deb, A.K., Grayman, W. and Snyder, J. (2005) A segment algorithm for isolating a subsystems in a water distribution network, International Conference on Efficient Use and Management of Urban Water Supply, Santiago, Chile, IWA.
6. Walski, T.M. (1993). Practical aspects of providing reliability in water distribution systems. *Reliability Engineering and System Safety*, **42**, pp. 13-19.