

BFS 알고리즘을 이용한 차단밸브의 최적 선정 모형에 관한 연구

이 경 훈 (전남대학교 토목공학과)

오 창 주 (전남과학대학 지리정보·토목과)

1. 서 론
 2. BFS 알고리즘
 - 2.1 자료의 구성
 - 2.2 탐색방법
 - 2.3 탐색의 평가함수
 3. 차단밸브 최적선정모형
 - 3.1 관로탐색 및 밸브탐색
 - 3.2 밸브수의 최소화
 4. 적용 및 고찰
 - 4.1 대상관망
 - 4.2 결과 및 고찰
 5. 결 론
- 참고문헌

1. 서론

상수도 배·급수 관로시설은 생산된 생활·공공·생산활동에 필요한 양과 질의 물을 관로를 통하여 압력하에서 연속적으로 공급하는 시설로서 수돗물을 위생적으로 안전하고 안정되게 공급하는데 그 목적이 있다. 따라서 상수도시설의 유지관리는 항상 목표수질의 달성 과 요구수량의 공급을 전제로 효율적인 운영이 지속 가능하도록 하여야 한다.

그러나 많은 대도시의 경우에서 도시가 성장함에 따라 배·급수시설이 복잡해지고, 상수도 시설이나 관로의 흐름을 제어하는 밸브 등의 부속시설, 또한 그 수가 많고 광범위하게 분포하게 된다. 또한, 관로는 지하에 매설되어 있는 관계로 상태의 파악이 어렵고 시설자료관리도 어렵기 때문에 효과적인 유지관리를 받지 못하고 있다. 따라서, 운영상 발생하는 사고 등에 효율적으로 대처하기가 어렵다. 특히, 돌발적인 관로사고의 경우, 복구가 늦어지면 막대한 수돗물의 손실을 가져올 수 있다. 그러므로 무엇보다 관로복구에 있어서 신속함이 우선되어야 하며, 두 경우 모두 피해지역이 적어지도록 단수구역을 최소화하도록 하여야 한다. 이러한 단수사고에 대한 효과적인 대처를 위해서는 위치파악이 가능하고 작동이 가능한 제수밸브 중에서 단수구역을 최소화시키면서 신속하게 사고지역을 고립시킬 수 있도록 차단밸브를 선택하여야 한다.

본 연구에서는 공학 등 여러 분야에서 폭넓게 응용되는 그래프 탐색기법인 **BFS(Breadth First Search)** 알고리즘을 이용하여 단수구역을 최소화하는 차단밸브 최적 선정모형을 제안하고자 한다.

2. BFS 알고리즘

수학적 자료구조 중의 하나인 그래프는 두 개의 절점으로 구성되며 임의의 그래프를 G 라고 하면 그래프 G 는 2개의 집합 V 와 E 로 구성된다. V 는 공집합이 아닌 정점(Vertex)의 유한집합이며, E 는 정점 쌍들의 집합으로 이러한 쌍을 간선(Edges)이라고 한다. $V(G)$ 와 $E(G)$ 는 각각 그래프 G 의 정점들의 집합과 간선들의 집합이며 임의의 그래프는 $G=(V, E)$ 로 표기할 수 있다. BFS알고리즘은 임의의 그래프 G 가 주어졌을 때, $V(G)$ 의 한 정점 v 에서 도달할 수 있는 G 의 모든 정점들, 즉 v 에 연결된 모든 정점들을 탐색하기 위한 방법이다.

한편, 그래프는 간선에 방향성 여부에 따라서 무방향 그래프와 방향 그래프로 분류할 수 있다. n 개의 정점을 가진 무방향 그래프의 최대 간선수는 $u \neq v$ 일 때, $(n-1)/2$ 이다. 무방향 그래프 G 에서 정점 u 부터 v 까지의 경로가 있으면, 두 정점 u 와 v 는 연결되었다고 한다. 이 경우, G 가 무방향이므로 v 에서 u 까지의 경로도 또한 반드시 존재한다. $V(G)$ 의 서로 다른 정점 u, v 의 모든 쌍에 대해서 u 에서 v 까지의 경로가 있으면, 그 무방향 그래프 G 는 연결되었다고 할 수 있다. 관망을 무방향 그래프로 간주한다면 이와 같은 조건을 충족하여야만 모든 관로가 연결되었다고 할 수 있다. 그래프의 정점과 간선을 관망에 있어서 각각 절점(Node)과 관로(Pipe)로 간주한다면 관망은 하나의 무방향 그래프로 표현할 수 있다.

2.1 자료의 구성

그래프를 표현하는 방법은 여러 가지가 있지만 어떠한 표현법을 사용할 것인가 하는 것은 대상 응용과 그래프상에 적용되는 함수에 의해 좌우된다. 본 연구에서는 알고리즘화 시 키기가 용이하고 관망데이터를 탐색자료화하기가 편리한 인접리스트(Adjacency Lists)를 사용하였다.

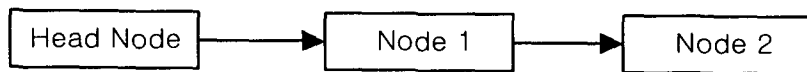


그림 1 인접리스트의 구성

인접리스트에서는 그래프 G 에 대한 하나의 Head Node에 대하여 한 개의 연결리스트가 존재한다. 그림 1에서 Node 1과 Node 2는 Head Node로부터 인접되어 있는 정점들을 의미한다. 그림 2의 그래프 G 에 대한 인접리스트는 그림 3과 같다.

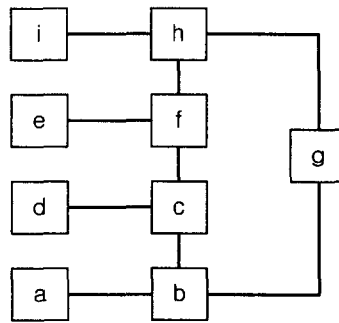


그림 2 그래프 G

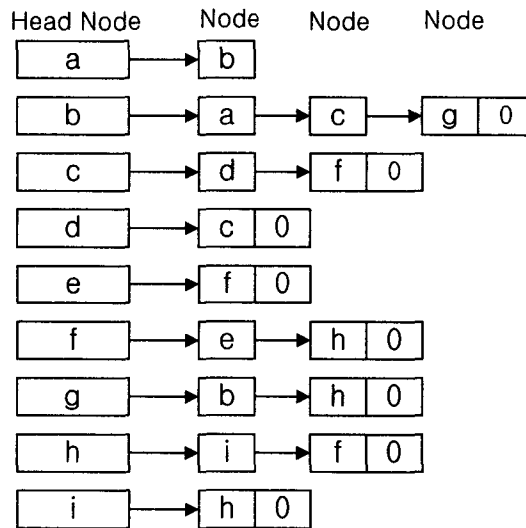


그림 3 그래프 G의 인접리스트

2.2 탐색방법

BFS알고리즘은 시작 정점 v 를 방문하는 것으로 시작한다. 다음으로 v 에 인접한 모든 정점(1세대)을 방문하고 나서, 이 새롭게 방문한 정점들에 인접하면서 아직 방문하지 못한 정점들(2세대)을 방문하는 방식으로 계속한다. 그림 3과 같이 구성된 인접리스트를 BFS알고리즘에 의하여 탐색하면 탐색순서는 그림 4와 같다. 인접리스트를 탐색함에 있어, n 개의 정점과 e 개의 간선을 갖는 무방향 그래프에서 탐색에 걸리는 시간은 $O(n+e)$ 이다.¹⁾

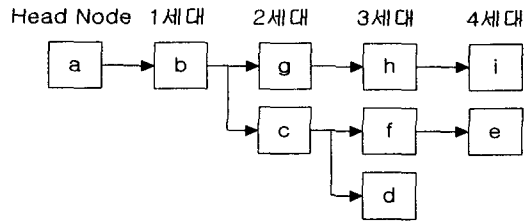


그림 4 BFS에 의한 그래프 G의 탐색

2.3 탐색의 평가함수

탐색은 정해진 조건을 만족시키는 최적의 어떤 해를 찾는 것이다. 어떤 기준으로 경로를 선택하는 것이 적절할지는 문제의 성격에 따라 다르지만 공통적으로는 세 가지 사항을 생각할 수 있다.

첫째, 해에 이르는 경로는 짧을수록 좋다.

둘째, 해의 탐색에 소요되는 계산비용은 작을수록 좋다.

셋째, 만약 해가 존재한다면, 탐색기법은 반드시 해를 찾을 수 있는 것이라야 한다.²⁾

이러한 해를 만족시키기 위한 경로를 찾는데 기준으로 사용할 수 있는 평가 함수는 일반적인 탐색기법에서는 최단의 경로를 의미한다.

평가함수를 정의하면, 임의의 노드 N 의 평가함수 $f(N)$ 을

$$f(N) = g(N) + h(N) \quad (\text{식 1})$$

으로 쓸 수 있는데, 여기서 $g(N)$ 은 초기노드에서 N 노드까지의 최단거리이며, $h(N)$ 을 N 노드에서 목표노드까지의 최단거리와 같이 정의한다면, 가장 작은 평가함수를 가지는 노드를 선택함으로써 빨리 해에 이를 수 있을 것이다. 식(1)은 초기노드에서 목표노드에 이르는 경로를 찾되, 노드 N 을 거치는 것을 제약조건으로 함을 의미한다.²⁾

관로사고 시 사고지역을 차단하기 위한 차단밸브탐색에 있어서 초기노드는 사고지역이 되고 목표상태는 단수구역을 최소화시키면서 사고지역을 완전히 고립시킬 수 있는 밸브노드가 된다. 이 경우, 탐색의 시점인 사고지점에서 밸브를 탐색하는 과정은 관로의 길이나 그 밖의 요소들은 관계없이 초기노드에서 목표노드에 이르는 경로를 찾되, 노드 N 을 거치는 제약조건만을 필요로 하게 된다. 그러므로 평가함수를 구성하는 $g(N)$ 과 $h(N)$ 은 최단거리와는 관계가 없게 된다.

따라서 밸브를 찾을 때까지 모든 관로를 소모적으로 탐색해나가는 맹목적 탐색(Blind Search)³⁾을 하여야 한다. 이러한 탐색은 관로탐색의 경우, 주어진 탐색자료인 인접리스트를 BFS알고리즘으로 탐색하면 모든 관로의 탐색이 가능하다.

3. 차단밸브 최적선정모형

3.1 관로탐색 및 밸브탐색

밸브를 차단하면 단수지역이 생기게 되는데, 밸브를 차단할 경우에는 누수지점을 고립시키면서 단수구역을 최소화하는 것은 매우 중요하며, 관로의 연결 여부가 관건이 된다. 그러므로 차단밸브의 탐색과정에 있어서 관로의 길이, 관경 등과 같은 관로의 조건은 밸브탐색 과정과는 무관하다. 따라서 관망의 각 절점의 연결관계(간선)만을 이용하여 인접리스트를 구성하고, 이를 차단밸브 탐색의 자료로 이용한다. 만일, 관망해석의 입력자료가 존재한다면 모형에 따라서 자료의 형식은 다소 차이가 있을 수 있으나 대부분의 관망해석 입력자료에는 시작절점과 끝절점으로 표현되는 관로자료가 있으므로 특히, 관망의 규모가 방대한 대도시에 있어서 이를 이용하면 차단밸브 탐색자료를 보다 쉽게 구성할 수 있다.

한편, 밸브는 관로상에 위치하므로 밸브를 탐색하기 위해서는 모든 관로의 탐색이 가능해야 한다. 인접리스트로 구성된 관망자료에서 탐색의 출발점은 누수가 발생한 관로의 절점에서 시작한다. 탐색의 시작점이 정해진 후 관망의 연결상태를 표현하는 인접리스트를 탐색하면 모든 관로의 탐색이 가능하다. 그러나 단수구역을 최소화하는 차단밸브를 탐색하기 위해서는 일반적인 탐색방법을 바로 적용할 수가 없으므로 별도의 조건을 부여해야만 탐색이 가능하다. 단수구역을 최소화 하는 차단밸브는 누수 지점에서 가장 가까운 곳에 위치한 밸브가 된다. 이러한 밸브는 관로탐색과정에 하나의 조건을 부여함으로써 탐색이 가능하다. 즉, 탐색도중에 밸브관로를 만나게 되면 탐색을 중지시킨다. 이는 누수발생 지점으로부터 탐색을 시작해 나가면서 만나는 첫 번째 밸브가 누수지점에서 가장 가까운 밸브가 된다는 것을 의미한다. BFS알고리즘에 의한 관로탐색의 순서도는 그림 5와 같고 차단밸브의 탐색의 과정은 그림 6과 같다.

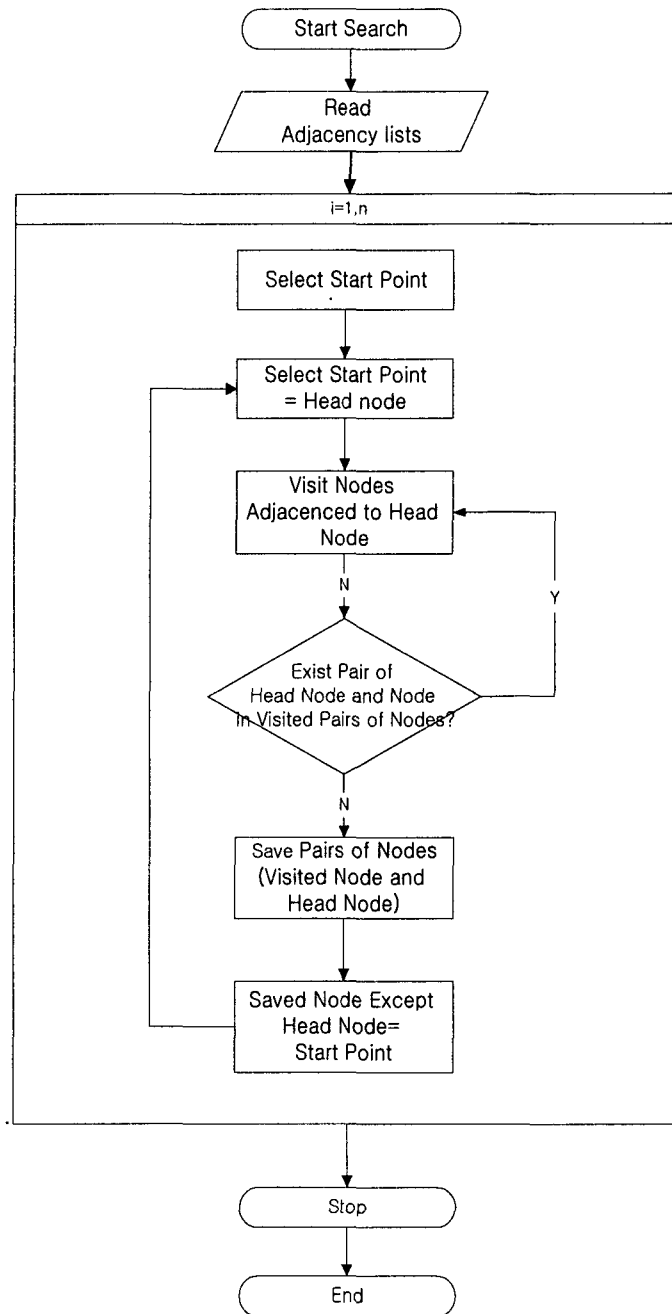


그림 5 BFS알고리즘에 의한 관로탐색의 순서도

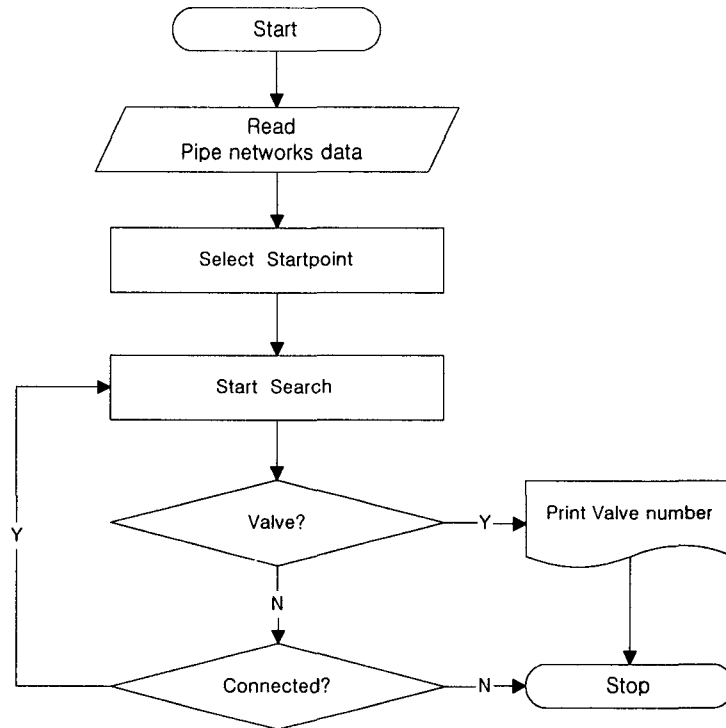


그림 6 차단밸브 탐색의 순서도

3.2 밸브수의 최소화

단수사고나 누수사고시 제어해야할 밸브를 신속하게 선택하고 차단하여야만 누수되는 수량을 경감할 수가 있다. 그러므로 차단밸브 선택에 있어서 고려해야할 또 하나의 중요한 문제는 차단할 밸브의 수를 최소화하는 것이다. 차단밸브를 최소화하는 과정은 관로탐색 및 밸브탐색과정이 종료된 이후에 실시된다. 이 과정은 전 단계의 탐색된 밸브와 관망자료를 이용하는데, 탐색된 밸브중 단수구역내에 위치한 밸브를 제외하면 필요한 차단밸브만을 선정할 수 있다. 이를 순서도로 나타내면 그림 7과 같고 차단밸브 탐색 및 선정을 위한 전체 순서도는 그림 8과 같다.

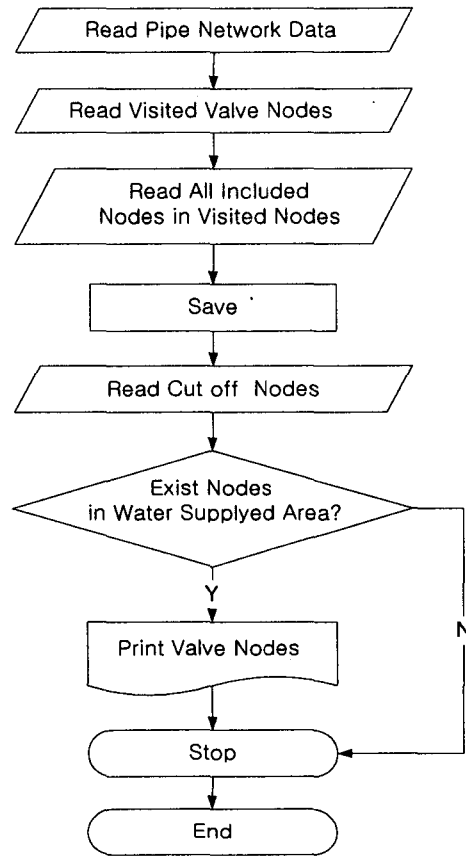


그림 7 차단밸브 개소수의 최소화 순서도

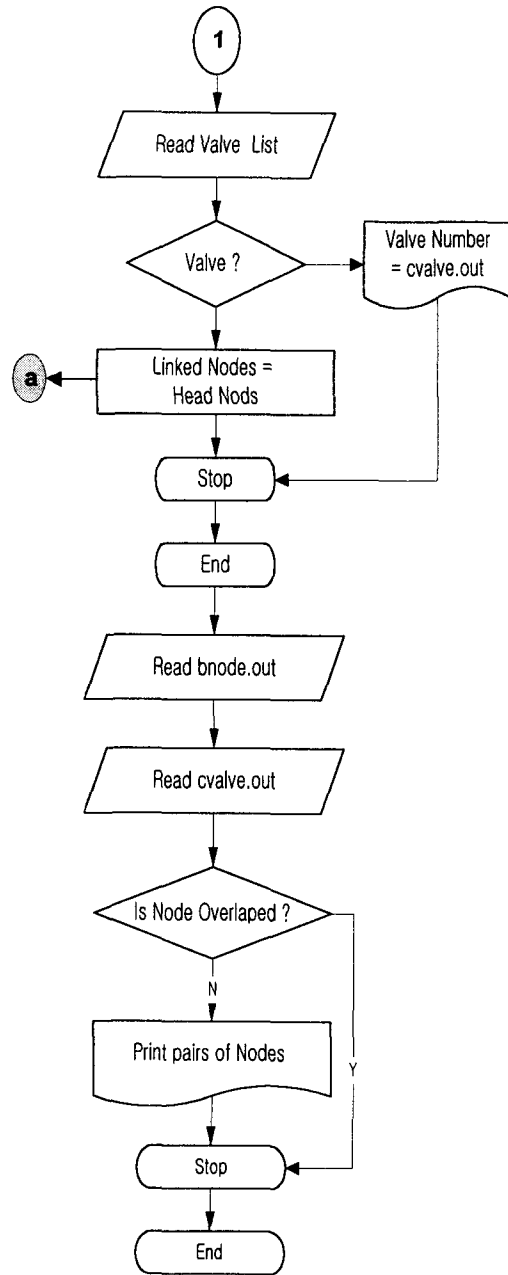
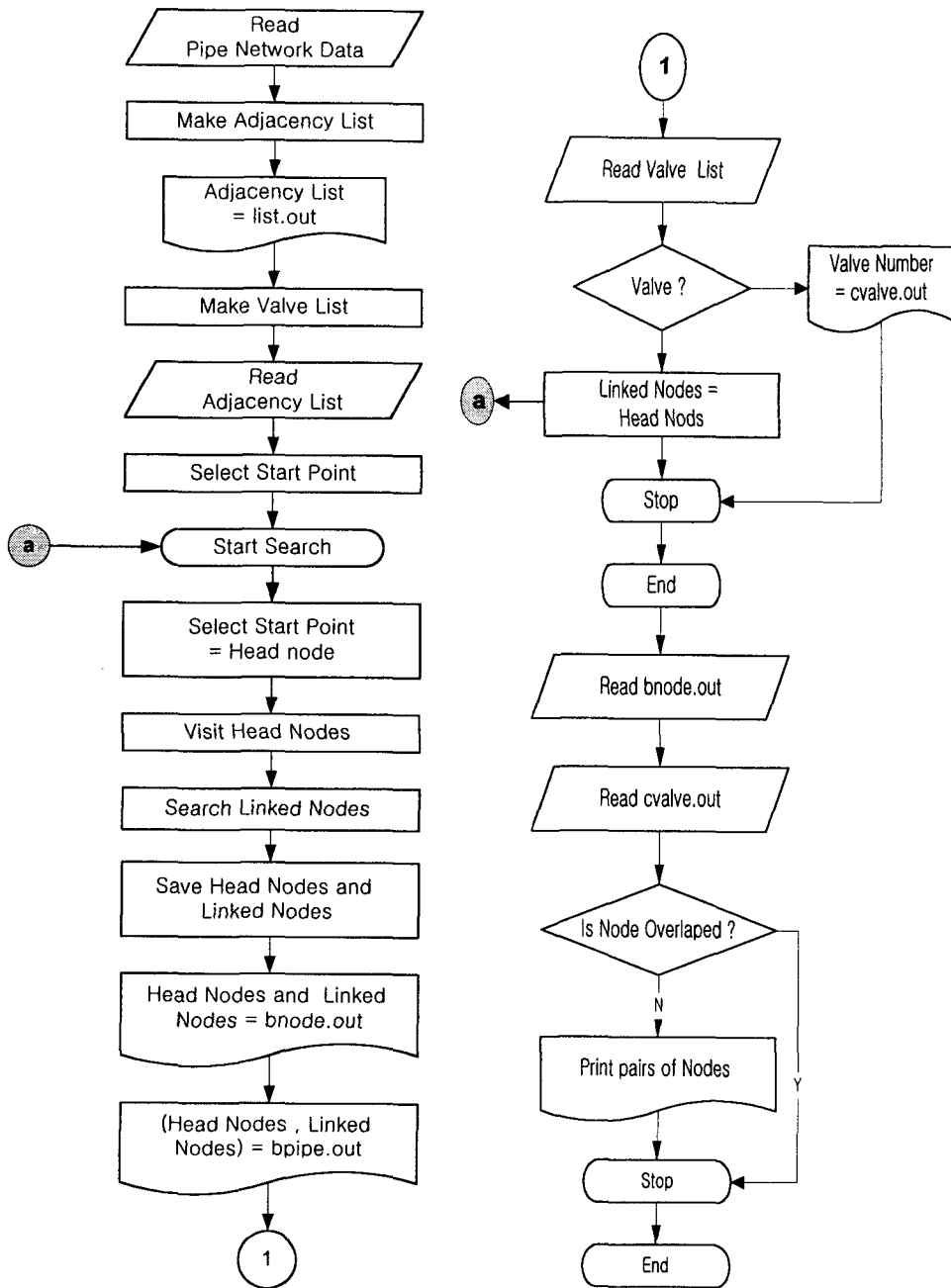


그림 8 차단밸브 최적 선정모형의 전체 순서도

3.3 입·출력 자료

3.1.1 입력자료

1) 관망해석 자료

모형의 입력자료는 관망해석모형 Pipenet98의 입력자료인 input.pm로 주어진다. 관로자료의 입력형식은 표 1과 같다.

여기서, i, j : 시작점과 종점

구분번호: 관로는 1, 펌프는 2

PIPE: 일반관로

BUTT100HAN: 밸브를 말하며 수동 버터플라이밸브를 뜻한다.

D : 관의 직경

L : 관의 길이

C : 일반관로일 경우는 Hazen-Williams 계수, 밸브일 경우에는 개폐도

Q : 펌프의 유량(m^3/min)

H : 펌프특성곡선 입력값

표 1 Pipenet98의 관로자료 입력형식

구분번호	관로번호	시점	종점	구분	관경 (mm)	관장 (m)	Hazen-Williams 계수 및 개폐도
1	1	i_1	j_1	PIPE	D_1	L_1	C_1
1	2	i_2	j_2	BUTT100HAN	D_2	L_2	C_2
2	3	i_3	j_3	Q	H_1	H_2	H_3

2) 밸브탐색자료 및 사고관로

밸브탐색자료는 inut.pm으로부터 관로자료를 추출하여 인접리스트로 변환되며, 입력자료는 사고가 발생한 관로의 관로번호를 입력한다.

프로그램을 실행하면,

THE NUMBER OF BREAK-PIPE ? <0 TO QUIT>

라는 메시지가 나타나고, 다음과 같이 사고관로의 번호를 입력한 후 0을 입력하고 프로그램을 실행한다.

1
2
0

3.1.2 출력자료

1) 인접리스트

밸브를 탐색하기 위하여 관망해석자료로부터 변환된 자료이며 표 2와 같은 형식으로 출력된다.

여기서, *HN*: HEAD NODE

N: LINK NODE

표 2 인접리스트 출력형식

HEAD NODE	LINK NODE	LINK NODE	LINK NODE
<i>HN₁</i>	<i>N₁</i>	<i>N₂</i>	<i>N₃</i>

2) 탐색된 밸브리스트

인접리스트를 탐색하는 과정에서 탐색된 모든 밸브에 대한 출력 자료이며, 표 3과 같은 형식으로 출력된다.

표 3 밸브리스트 출력형식

밸브번호	시점	종점
<i>NV</i>	<i>i</i>	<i>j</i>

3) 선정된 밸브리스트

색된 밸브 중 최적으로 선정된 밸브이며 관로사고시 차단대상 밸브이다. 출력형식은 표 3과 동일하다.

4) 폐쇄구역내의 절점과 관로

차단되는 밸브에 의하여 폐쇄되는 지역내에 위치한 절점과 관로이다. 폐쇄관로의 출력형식은 표 3과 동일하다.

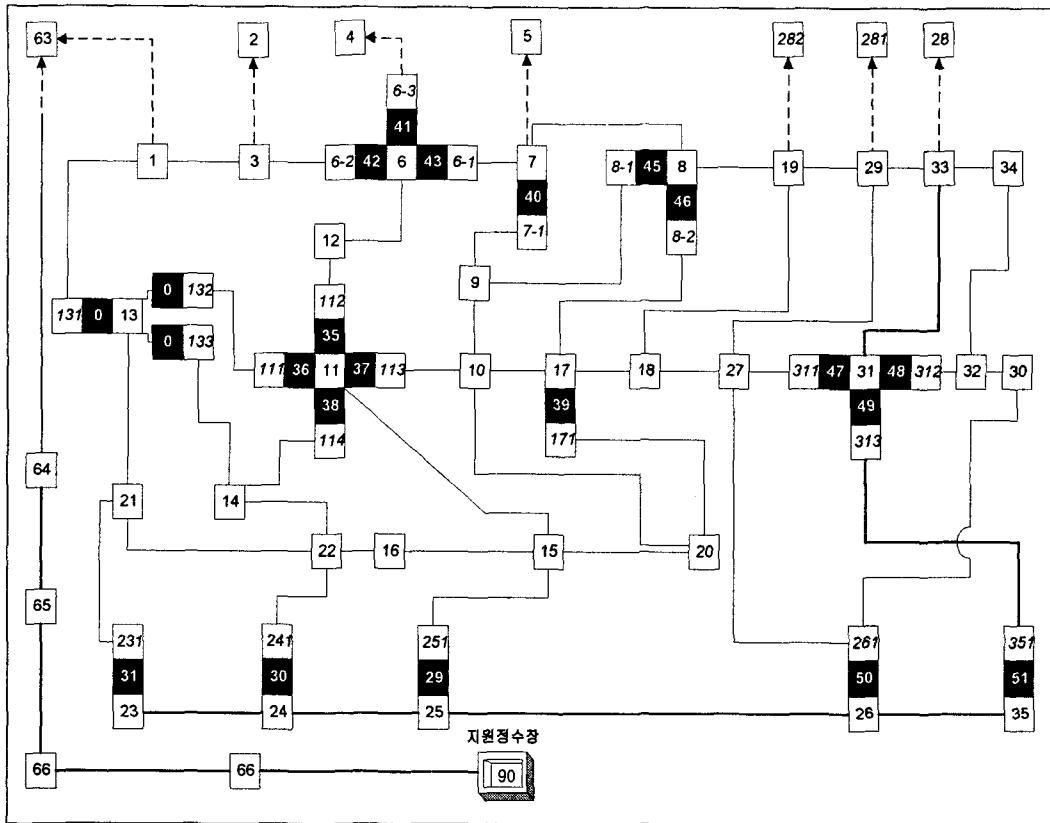


그림 9 (계속)

4.2 결과 및 고찰

관로사고는 어느 곳에서나 발생할 수 있으며 관망의 조직과 환경에 따라서 단수지역의 규모나 위치가 다르게 나타날 수 있다. 그리고 단수구역은 차단밸브에 의하여 폐쇄되는 지역에만 영향을 줄 수도 있고 그렇지 않은 지역에 영향을 줄 수도 있다. 이와 같은 영향을 알아보기 위하여 일부 관망에 대하여 두 가지의 관로사고 유형을 고려하였다. 그림 10은 대상관망의 인접리스트 출력자료이다.

4.2.1 관로사고 유형 1

1) 차단밸브 선정

사고관로를 18(47, 48), 40(49, 53)번 관로인 관경 150mm의 비교적 소구경 관로로 가정하여 모형에 적용하였다. 적용 결과로 선정된 차단밸브는 그림 11과 같다.

2) 단수구역

밸브차단 이전과 관망해석 모형인 PIPENET98의 계산결과에 의한 밸브차단 이후의 수압을 비교한 결과는 그림 12와 같다. 여기에서 실선은 밸브차단이전의 수압이고 점선은 밸브차단 후의 수압이다. 밸브 선정모형에 의하여 탐색된 단수절점과 관망해석 결과의 부압이 발생한 절점을 비교하면 표 4와 같다. 차단밸브탐색 결과로 나타난 절점이 모두 부압이하로 내려갔으며 나머지 절점들은 밸브차단 이전과 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

No.	From	To
6	63	632
15	54	543
24	36	363
25	36	361
26	36	362
46	49	492
47	49	491

그림 11 관로사고 유형 1에 대한 차단밸브 출력자료

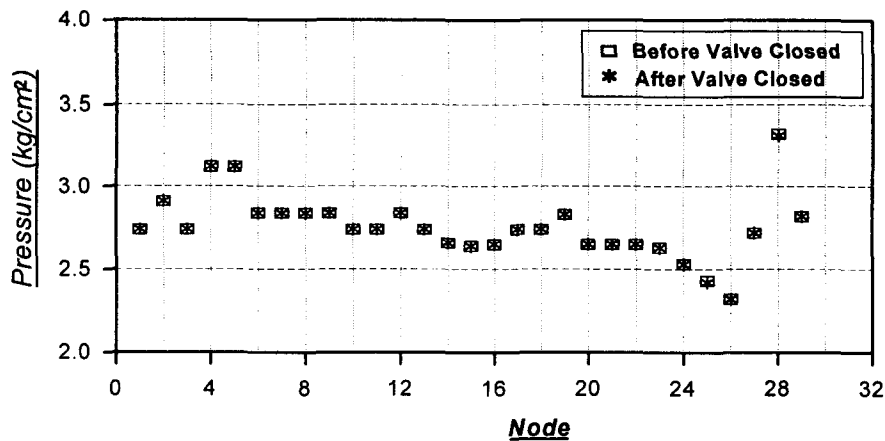


그림 12 관로사고 유형 1에 대한 관망해석 결과

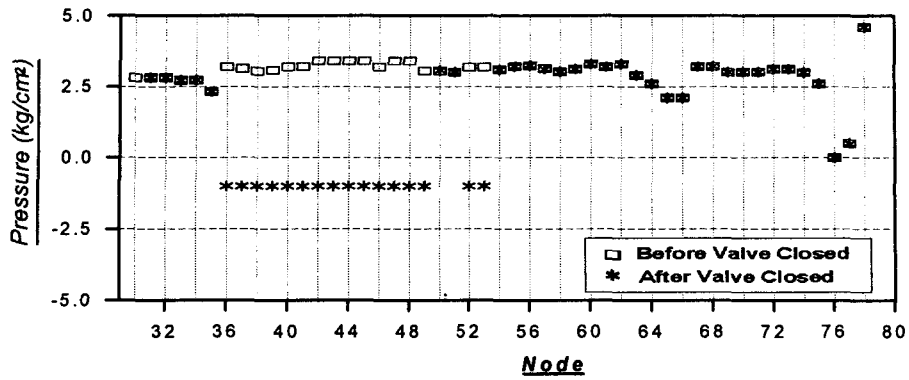


그림 12 (계속)

표 4 관로사고 유형 1에 대한 단수절점 비교

모형에 의한 단수절점	38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 53, 361, 362, 363, 461, 462, 463, 493, 543, 632
관망해석 결과 부압이 발생한 절점	38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 53, 361, 362, 363, 461, 462, 463, 493, 543, 632

단수구역을 지형도상에서 표시하면 그림 13과 같다. 이 경우는 밸브에 의해 폐쇄된 지역만 영향을 받는 것으로 나타났다.

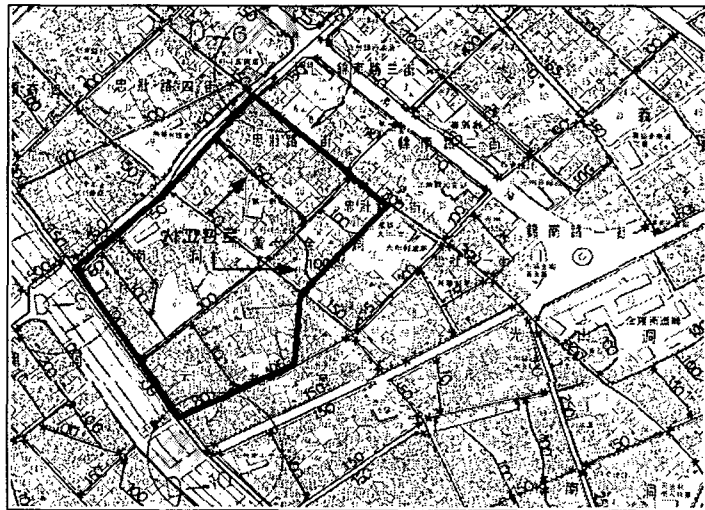


그림 13 관로사고 유형 1에 대한 단수구역

4.2.2 관로사고 유형 2

관경이 1000mm의 대구경 관로인 10(621, 60)번 관로에서 사고가 발생한 것으로 가정하였다. 관로 양쪽에 밸브가 있으므로 차단밸브는 4번과 25번 밸브이고 차단후의 수압의 변화는 그림 14와 같다. 그림에서 보여지듯이 부압이 발생한 절점은 사고관로외에는 없다. 그러나 전체적으로 수압이 낮아졌고, 일부절점에서는 1kg/cm^2 이하의 빈압이 발생하였다. 이 지역은 밸브차단으로 폐쇄되는 지역이 아니지만 출수불량이 예상된다. 빈압이 나타난 지역들을 중심으로 출수불량지역을 표시하면 그림 15와 같다. 그림에서 나타나 있듯이 사고지역과는 거리가 있지만 빈압이 발생하였다.

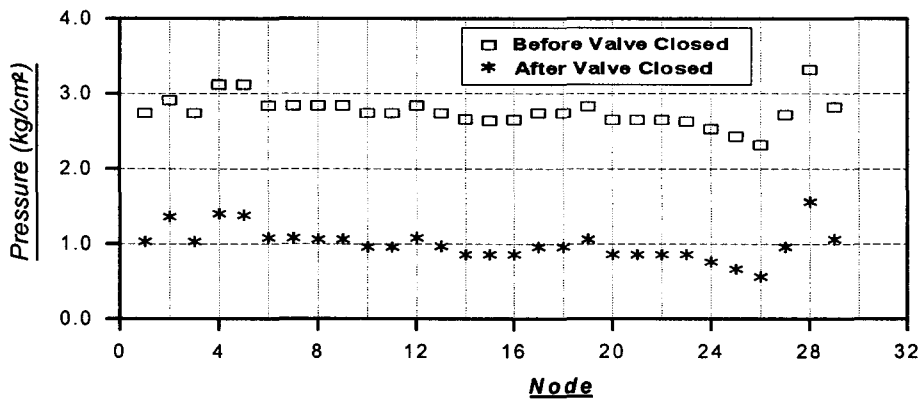


그림 14 관로사고 유형 2에 대한 관망해석 결과

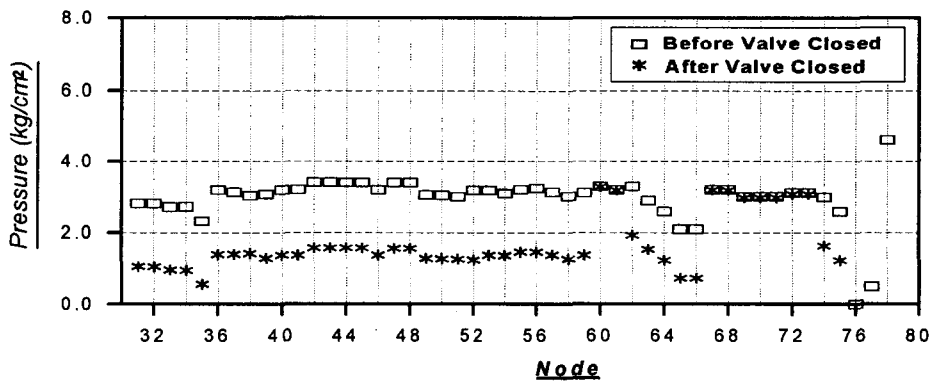


그림 14 (계속)

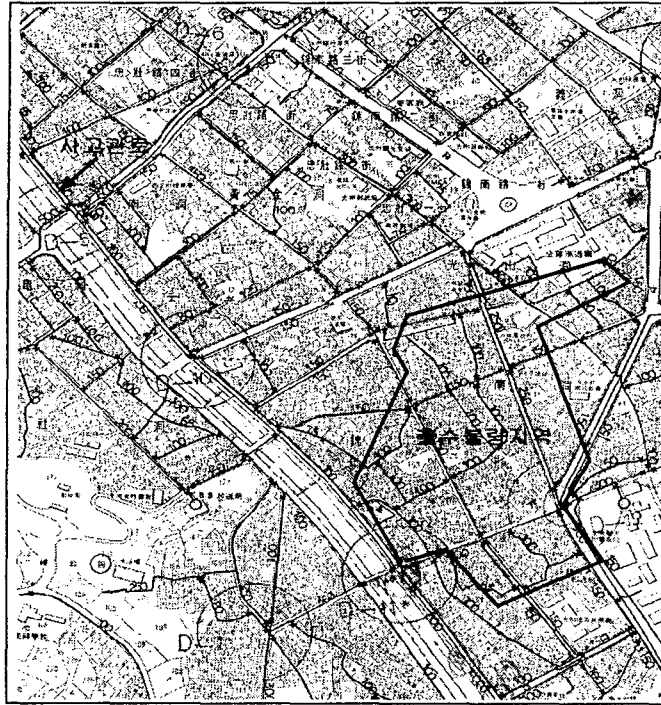


그림 15 관로사고 유형 2에 대한 출수불량지역

5. 결론

본 연구에서는 상수도 배·급수관망을 유지 관리함에 있어 누수나 관로사고시에 단수구역을 최소화하면서 신속하게 사고지역을 고립시킬 수 있도록 하기 위한 차단밸브 최적 선정모형을 제안하였다. 이 모형은 공학 등 여러 분야에서 폭넓게 이용되어 왔으나 관망 유지관리 분야에서는 적용한 사례가 없는 그래프 탐색기법인 BFS알고리즘을 응용한 것이다.

1. 본 연구에서 제안한 차단밸브 최적 선정모형을 실제 단수사고에 적용할 경우, 보다 신속하고 효과적인 단수대처가 될 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 상수도 급 배수관망의 운영상 발생하는 돌발적인 관로사고로 인한 피해를 줄이는데 도움을 줄 수 있을 것이다.
2. 차단밸브 최적 선정모형의 밸브탐색자료는 관망해석자료의 일부를 이용하기 때문에 관망해석을 위한 입력자료의 산출과정 이외의 별도의 탐색자료 산출과정이 필요하지 않다. 따라서 배·급수관망 시설의 규모가 방대한 경우, 자료구성이 보다 효과적이며 관망해석모형의 추가적인 기능으로도 활용이 가능하다.
3. 관로사고시 보다 효과적인 단수대처가 되기 위해서는 관로의 흐름변화도 고려되어야 한다. 본 연구에서 제시한 차단밸브 최적 선정모형은 이러한 관로내 유수의 흐름추적에 응용할 수 있으며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.
4. 본 연구에서 제시한 자료구성 방법과 차단밸브 선정모형을 적용하면 상수도 배·급수 시설 운영의 전산화가 가능하므로 밸브 자동제어에 적용할 수 있다.
5. 상수도시설 유지관리분야 및 유사한 구조를 가진 유체운송시스템에 관망의 규모와 관계없이 적용 및 응용이 가능하다.

참고문헌

1. 박후열, “토목계획학”, 영남대학교출판부, pp.332-333, 1994.
2. 이석호, “자료구조론”, 교보문고, pp.384-423, 1998.
3. R. C. Read and C. Berge, “Graph Theory and Computing”, Academic Press, pp.103-120, 1972.
4. 건설부, “상수도시설기준”, 1992.
5. Y. Morishit, “Development of Leak Detection System Using High Temperature-Resistant Microphones”, Nuclear Science and Technology, Vol. 32, No. 3, pp.237-239, 1995.
6. V. Rao, “Improved Design of Branched Networks by Using PRV”, Journal of Hydraulic Engineering, pp .78-84, April, 1998.
7. D. B. Sharp and D. M. Campbell, “Leak Detection in Pipes Using Acoustic Pulse Reflectometry”, Source Acustica, Vol. 82, pp. 560-566, 1997.
8. M. Shimada, “Graph-Theoretical Model for Slow Transient Network Analysis of Pipe Networks”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 115, No. 9, pp.1165-1183, 1989.
9. D. H. Axworthy and B. W. Karney, “Valve Closure in Graph-Theoretical Model for Slow Transient Network Analysis”, Journal of Hydraulic Engineering, pp. 384-389, April 2000,