

상수관망에서의 밸브에 의한 관의 부분적 격리와 상수관망의 효율성 평가

Isolating Subsystems by Valves in a Water Distribution System and Evaluating the System Performance

전 환 돈*

Jun, Hwan Don

Abstract

Recent concerns regarding protecting, identifying, isolating, redundant routing and dewatering of subsystems of water distribution networks have led to the realization of the importance of valves in these systems. Valves serve two purposes namely, flow and pressure control and isolating subsystems due to breakage or contaminant containment. In this paper, valves are considered from the point of view of subsystem isolation. When a water main is required to be closed, it may be in general necessary to close several other pipes in addition to the broken pipe itself depending on the distribution of adjacent valves. This set of pipes is defined as a segment. In this paper a segment analysis for isolating pipes is present and based on the segment analysis, we suggested the Valve Importance Index and the 7 performance indicators to evaluate the system performance. The suggested methodology is applied to a real network to verify the applicability of the methodology.

keywords : Pipe network, Segment, Isolation, Performance Indicator

요 지

최근의 상수관망의 안전도 확보, 부가적 용수공급로 확보, 그리고 관(管)내 배수를 위한 부분적인 상수관망의 격리문제가 대두 되면서 이를 위한 밸브역할의 중요성이 인식되고 있다. 기본적인 상수관망에서의 밸브역할은 물의 흐름과 압력조절 그리고 관 파괴와 오염물 확산시 부분적 관의 격리라고 할 수 있다. 이 중 본 논문에서는 관의 격리 기능을 중심으로 밸브를 해석한다. 관의 파괴로 인한 부분적인 상수관망의 격리시에 일반적으로 그 관만이 아닌 주변의 다른 관들도 함께 격리가 될 수 있으며 이것은 격리하고자하는 관에 설치된 밸브배치에 따라 달라진다. 본 논문에서는 밸브의 배치에 따라 함께 격리되는 관들을 하나의 단위로 보며 이것을 "Segment"라 부른다. Segment에 따라 실제 격리되는 관의 범위가 주어지며 이것에 따라 전체 상수관망을 나눈 후 각 밸브의 중요도와 상수관망의 효율성 평가에 이용한다. 효율성 평가를 위해 7개의 효율성 지수를 제안하며 실제 상수관망에 적용하여 사용성을 검증한다.

핵심용어 : 관망, Segment, 부분 격리, 효율성 지수

* Ph.D, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Virginia Tech, USA
(e-mail: hwandonjun@gmail.com)

1. 서 론

일반적으로 상수관망의 부분적 격리문제는 신규 상수관망의 기획단계와 기존 상수관망의 효율성 평가에서 사용되어 진다. 신규 상수관망의 기획단계에서는 주어진 관들의 위상(位相, topology)에 따른 최적 밸브배치를 구하여 효율적인 부분적 관망의 격리를 실현할 수 있으며, 기존 상수관망의 분석에서는 현재의 관의 위상과 밸브의 배치를 바탕으로 상수관망의 효율성을 분석한다. 또한, 기존 관망을 증설하거나 밸브의 추가 설치로 시스템의 효율성을 높일 경우에도 적절한 밸브의 배치는 중요한 문제이며 오염물에 의한 상수관망의 오염, 테러로 인한 독극물의 투입시 이러한 물질의 확산을 막거나 세척을 통해서 상수관 밖으로 폐기할 때에도 적절한 밸브배치의 중요성은 부각된다.

현재 상태의 밸브배치와 상수관망의 증설 또는 추가적 밸브의 도입 문제를 해결하기 위해서는 다양한 밸브 배치 상호간의 우열을 판별해야 할 것이다. 밸브 배치의 우열판별을 위해서는 효율성 지수 (Performance Indicators)와 같은 부분적 상수관망의 격리로 인해 영향을 받는 소비자의 수, 관 파괴나 기타 상수관 유지관 리활동을 위해 격리되어야 하는 관의 범위 등으로 산출이 가능한 밸브 효율에 대한 객관적 기준이 필요하다. 이와 같은 밸브 배치의 결정 및 밸브 효율과 관련된 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.

Bouchart와 Goulter (1991)는 관 파괴시 물손실 최소화 가능한 밸브배치를 결정하는 모델을 제안하였다. 이 모델은 관 파괴시 발생하는 물손실을 파괴된 관에 한정하여 계산하였고, 나머지 부분에 발생하는 영향은 고려하지 않았으며 파괴된 관에 두개의 밸브가 해당 관의 양끝에 설치되어 있다는 전제조건이 있는 제약적인 모델이다. Walski (1993)는 실제적인 밸브와 상수관망의 부분적 격리를 분석하기 위하여 “segment” 개념을 제안하였으며 Hoff (1996)는 실제 상수관망을 중심으로 밸브의 관리와 선택에 대한 기준을 제시하였다. Walski (2002)는 화재발생시 필요한 순간적인 용수로 인한 상수관망 내 수리학적 변화를 개개 관을 격리 하였을 때와 밸브의 배치를 고려한 segment를 기반으로 관을 격리 하였을 때로 구분하여 모델링한 결과를 비교하였다. Deb (1994, 1995)은 광범위한 실제 상수관망을 운영하는 기관과의 설문조사와 인터뷰를 실시하여 적절성 (Adequacy), 신뢰성 (Dependability) 및 효율성 (Efficiency)을 기준으로 상수관망의 효율성 평가를 위한 분석기준을 제시하였다.

Walski (2002)의 연구에 의하면, 간선에 포함된 관이

영향을 받게 되면 상수관망 전체에 영향을 미칠 수 있기 때문에 간선이나 큰 직경의 관에는 적절한 밸브를 배치하여 지선이나 작은 직경의 관 파괴 시 segment로 포함되어 함께 격리가 되는 경우를 방지해야 하며, 어떤 관의 파괴가 전체적인 상수관망에 큰 영향을 미치지 않을 수도 있다. 즉, 상수관망에 중요한 영향을 미치는 관과 그렇지 않은 관을 구분하는 것과 중요한 관의 신뢰도를 높이는 관리는 필요할 것이다.

한편, 미국 경우 보스턴의 상수관망에서 약 4.2%의 밸브가 작동을 하지 않은 것으로 보고되었으며(Shea, 1991), 실제로 밸브 자체의 이상은 없으나 해당 밸브에 접근 할 수 없는 경우도 약 4%(KIWA and AWWARF, 2001) 인 것으로 보고되었다. 따라서, Walski (2002)의 분석을 실제 상수관망에 적용하기 위해서는 필요시 실제로 밸브를 닫을 수 없는 경우 분리 된 segment 이외에 인접한 segment를 추가로 격리하는 것을 고려해야 할 것이다.

한국에서는 성창환 등(1999)이 밸브의 조절을 통하여 상수관망의 누수를 분석하였으며, 이경훈 등(2001)에 graph theory를 바탕으로 한 관망제어 밸브 탐색 알고리즘을 제안하였다.

본 연구에서는 밸브의 효율적 관리를 위해 Walski (1993)가 제안한 segment를 바탕으로 밸브의 오작동시도 고려한 segment 분리 기법을 제시하였다. 또한, 분리되어진 segment를 바탕으로 상수관망의 효율성을 평가를 위하여, 밸브의 관리의 우선순위를 결정하는 Valve Importance Index(VII)와 7가지의 상수관망의 효율성 평가 지수를 제안하였다.

2. 상수관망에서의 segment

2.1 Segment의 정의

그림 1은 8개의 관과 두개의 수원 그리고 9개의 밸브로 이루어진 상수관망의 예를 나타내고 있다. 상수관망을 나타내기 위한 일반적인 link-node 가정에서는 그림 1과 같이 관은 link로 대표되고 용수수요지점 (demand node)은 절점(node)으로 대표된다. 기존의 분석에서는 파괴된 관은 하나의 link로 대표되어 그 link만 격리되고 수리모형이나 최적화 모델에서 제거되는 것으로 가정하였으며, 해당 link의 제거 후 관의 파괴에 따른 추가적인 수리학적 모의나 피해분석이 이루어졌다. 그러나, 실제 상수관망에서는 관 파괴시 격리되는 관의 범위는 파괴된 관 주변에 설치된 밸브의 배치에 따라 인접한 관 또한 파괴된 관과 함께 격리될 수 있다.

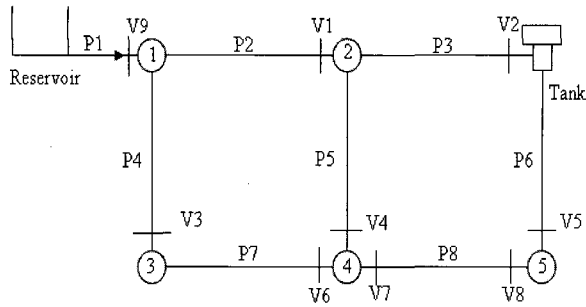


그림 1. Sample Network : Link-Node 가정

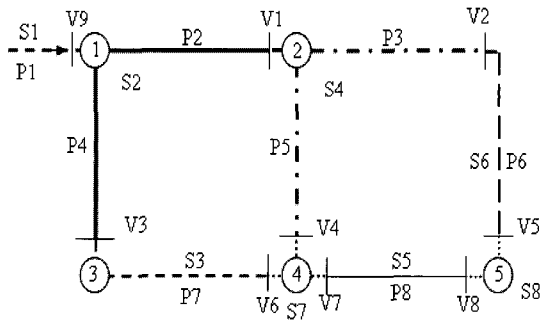


그림 2. Segment in Sample Network

Walski (1993)는 이와 같이 관 파괴시 밸브의 닫음으로 인해 함께 격리되는 부분을 segment로 정의하였다. 관이 두개의 밸브를 양끝에 가지고 있는 경우 이 관은 하나의 segment로 정의할 수 있으며, 한 관을 격리시키기 위해 그 관에 인접한 관들도 함께 격리해야 할 경우 함께 격리되는 관들을 하나의 segment로 정의한다. 그림 2에 그림 1의 상수관망을 segment로 구분하여 나타내었다.

관 P2가 파괴될 경우 관 P2의 수리를 위하여 격리를 하여야 하며 관 P2 양끝에 두개의 밸브가 설치되어 있지 않으므로 주변의 밸브, 즉, V1, V3, 와 V9가 닫혀야만 파괴된 P2를 수리 할 수 있게 된다. 이때 관 P4 또한 다른 관들로부터 격리되며 관 P2와 P4로 이루어진 segment S2를 정의할 수 있다. Segment S5는 관 P8으로만 이루어지는데 이것은 관 P8에는 두개의 밸브 (V7과 V8)가 설치되어 있으므로 두개의 밸브를 닫음으로 해서 P8만 격리가 가능하기 때문이다. 관만이 segment가 될 수 있는 것은 아니며 절점 또한 segment의 구성요소이다. 그림 2에서 segment S7과 S8은 관 없이 하나의 node로만 구성이 되는데 이러한 특별한 경우의 segment를 “node segment”라 정의한다. Node segment에서는 관이 없기 때문에 관의 파괴에나 관리를 위해서 나타나지는 않으나 탱크나 펌프가 node

segment가 될 수 있으므로 이런 부분이 고장을 일으킬 경우에 발생할 수 있다. Segment에 포함 되는 관의 수나 범위는 각 관에 설치되어 있는 밸브의 배치에 따라 달라지며 실제 관 파괴에 따른 수리학적 조건의 변화를 모의하거나 파괴범위를 예측하고자 할 때 기존의 Link-Node 가정보다 Segment를 이용한 가정이 좀 더 정확한 예측이 가능할 것이다.

2.2 Matrix Algorithm(Segment 정의 Algorithm)

본 연구에서는 정의된 Segment를 실제 상수관망에 효율적으로 응용하기 위하여 Node-Arc matrix (A matrix), Valve Location matrix (B matrix) 및 Valve Deficiency matrix (C matrix)로 구성된 Matrix Algorithm을 개발하였다.

- Node-Arc matrix (A matrix) :

Node-Arc matrix는 기본적인 상수관망의 구조와 절점과 관 사이의 관계를 나타낸다. Matrix에서 절점은 행으로 관서는 열로 표현되고 절점과 관가 연결 되어 있어 절점이 관가의 끝점이 되면 “1”의 값을 갖으며, 아닌 경우 “0”의 값을 갖는다. 그림 2의 상수관망에서 관 P2와 P4의 Node-Arc matrix는 다음 그림 3과 같다.

	P2	P4
1	1	1
2	1	0
3	0	1

그림 3. Node-Arc matrix의 예

- Valve Location matrix (B matrix):

Valve Location matrix는 상수관망에 분포되어 있는 밸브의 위치를 나타내며, Node-Arc matrix 와 같은 구조를 갖는다. 하나의 관가와 그 관가의 절점에 가까이 밸브가 설치되어 있으면 “1”, 없으면 “0”으로 표시된다.

	P2	P4
1	0	0
2	1	0
3	0	1

그림 4. Valve Location matrix의 예

- Valve Deficiency matrix (C matrix):

Valve Deficiency matrix는 상수관망에서 밸브가 설치되어 있지 않은 지점을 나타내며 다음 식 (1)과 같이 A 와 B matrix의 산술적 차이로 구해진다.

$$C \text{ matrix} = A \text{ matrix} - B \text{ matrix} \quad (1)$$

	P2	P4
1	1	1
2	0	0
3	0	0

그림 5. Valve Deficiency matrix의 예

고안된 Matrix Algorithm은 C matrix를 바탕으로 이루어지며 “Row Search”와 “Column Search”를 번갈아서 진행하여 해당 segment에 포함된 절점과 관을 결정한다. 그림 6은 그림 2의 관 P4 파괴 시에 나타나는 segment S2를 결정하는 과정을 나타낸다. 관 P4의 파괴 시 먼저 {P4} 행에서 “Column Search”를 실시하여 “1”을 찾는다. 이때 두 번째 열인 절점 {1} 열에서만 “1”이 발견되었으므로 절점 {1} 열에 대해서만 “Row Search”를 시행한다. 절점 {1} 열에서의 “Row Search”에서 {P2} 행에서만 “1”이 발견되었으므로 {P2} 행에 대해서만 “Column Search”를 실시한다. {P2} 행에서 추가로 “1”이 발견되지 않았으므로 전체 과정이 종료되며 “Column Search”에 의해서 절점 {1} 은 segment 내에 있는 것으로 판정되고, “Row Search”에서 {P2} 가 segment 내에 있는 것으로 판정된다. 관 {P4} 는 파괴된 사실을 알고 있으므로 자동으로 segment에 포함된다. 따라서 관 {P4} 의 파괴에 의해 생성되는 segment S2는 관 { P2, P4 }와 절점 { 1 }로 이루어진다. 이와 같은 과정을 통해 어떤 관이 파괴되어도 해당 segment가 정의 될 수 있다.

3. 상수관망의 효율성 평가지수

3.1 Valve Importance Index (VII)

상수관망의 적절한 관리와 시스템의 효율성 평가는 상수관망을 통해 용수를 공급받는 소비자에게 안정적인 서비스를 제공하기 위하여 필수적이며, 이를 위하여 관 파괴나 부분적인 개량을 할 경우 영향을 받는 소비자를 최소화 하여야 한다. 상수관망의 부분적 격리는 해당 영역 밸브를 닫아서 실시하나, 밸브가 적절히 작동을

하지 않는 경우 영향을 받는 소비자의 수가 늘어나게 될 것이다.

상수관망에 설치된 밸브는 주기적으로 관리하여 필요시 정확하게 작동 하도록 하는 것이 중요하지만 규모가 큰 상수관망의 경우 설치된 밸브의 수가 몇 천개에서 몇 만개 단위이므로 이를 관리하기 위한 비용과 시간이 소요가 많을 것이다. 이때 우선적으로 중요한 밸브를 선정하여 최적의 상태를 유지하게 하기위한 관리를 할 수 있다면 비용과 효과 면에서 큰 이점을 얻을 수 있을 것이다.

본 논문에서 상수관망을 관리하는 엔지니어가 밸브 관리의 우선순위를 평가하는데 도움을 주기 위해 각 밸브의 중요성을 그 밸브가 고장 났을 경우로 가정하여 영향을 받는 소비자의 수로 나타낸 후 전체 소비자의 수로 나누어서 Valve Importance Index (VII)라 정의하였다. 각 밸브별 VII는 다음 식 (2) 와 같다.

$$\text{Valve Importance Index(VII)} = \frac{C_V}{C_T} \quad (2)$$

여기서, C_V : 해당 밸브가 작동을 안 할 경우 추가로 영향을 받는 소비자의 수, C_T : 상수관망에서 물을 공급 받는 전체 소비자의 수

두 segment를 분리하고 있는 밸브가 작동을 하지 않는 경우 필요시 한쪽 segment를 격리할 수 없을 것이며 인접한 segment도 함께 격리되어야만 처음의 segment가 격리 가능하다. 따라서 식 (2)에서는 C_V 를 해당 밸브에 의해서 분리되어 있는 두 segment내에 있는 소비자의 수로 정의 하였다.

그림 2의 상수관망을 예로 들어 다시 설명하면, 먼저 전체 소비자수(= C_T)를 2,000명, segment S2에는 200명, segment S4에는 300명의 소비자 연결되어 있다고 가정한다. 관 P2의 파괴로 segment S2가 격리되기 위해서는 V1, V3, 와 V9가 닫혀져야 하며, 이중 V3과 V9는 작동을 하였으나 V1이 작동을 하지 않는 경우, S2를 격리하기 위해서는 segment S4의 V4와 V2가 추가적으로

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Reservoir	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0	0
Tank	0	0	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0

그림 6. Segment S2의 정의

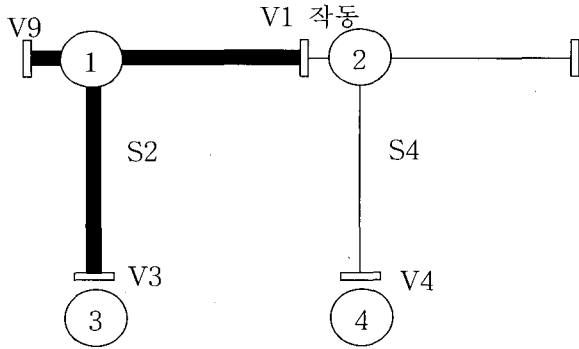


그림 7. V1 작동시 격리되는 segment

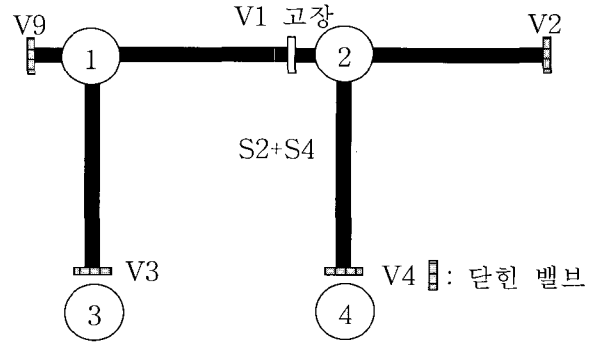


그림 8. V1 고장시 격리되는 segment

로 단절해야 한다. 이 경우 segment S2와 S4의 격리로 총 500명 (= 200 + 300)의 소비자가 물 공급을 받지 못하게 된다. 만약 V1이 작동하였다면 200명만 영향을 받게 되지만, V1의 오작동으로 인하여 segment S4의 300명이 추가로 영향을 받게 되었다. 반대로 관 P3이 파괴되어 segment S4를 격리하려 하나 V1에 문제 발생 시에는 segment S2 또한 격리되어야 할 것이다. 이때 영향을 받는 총 소비자의 수는 P2 파괴 시와 같이 500명이 되며 만약 V1이 작동을 하였다면 300명만 영향을 받으나 그렇지 못하였기 때문에 추가로 200명이 영향을 받게 된 것이다. 즉, V1의 작동에 의해 영향을 받는 소비자의 수는 S2와 S4 내에 있는 소비자의 총수와 같아지며 밸브 V1의 VII는 0.25 (= 500 / 2000) 가 된다.

3.2 상수관망의 효율성 평가지수

본 연구에서는 상수관망의 효율성 평가를 위하여 segment와 밸브의 배치를 기본으로 하는 7개의 효율성 평가지수를 제안하였다. 제안된 효율성 평가 지수는 다음과 같다.

① Segment 평균길이(Average Length of Segment)

$$l_a = \frac{\sum_i l_i}{n_s} = \frac{\text{전체 관의 길이}}{n_s} \quad (3)$$

여기서, l_i : 각 Segment 의 길이, n_s : 상수관망 segment 의 총수

전체 segment의 평균 길이로 이상적인 상수관망의 경우 각 관은 한 개의 Segment에만 포함하므로 전체 관의 평균길이와 같다. Segment 평균길이가 큰 값을 가지면 특정 segment가 많은 관을 포함하는 경우로 적절한 밸브의 추가 배치로 큰 segment를 나눌 수 있을 것이다.

② 관 당 평균 밸브 개수(Average number of valves per pipe)

$$V_{npp} = \frac{n_V}{n_P} \quad (4)$$

여기서, n_V : 설치된 밸브의 총수, n_P : 관의 총수

이상적인 시스템의 경우 각 관에 두 개의 밸브가 설치되어 있으므로 관 파괴 시 해당 관만 상수관망의 다른 부분과 격리된다. 즉 이상적인 시스템의 경우 이 효율성 지수의 값은 2이다.

③ 한 Segment 격리를 위한 평균 밸브 수(Average number of valves to be closed to isolate a segment)

$$V_a = \frac{\sum_i (V_n)_i}{n_s} \quad (5)$$

여기서, V_n : segment i를 닫기 위한 밸브의 수, n_s : 전체 segment의 수

이상적인 상수관망의 경우 두 개의 밸브로 Segment를 격리시킬 수 있으며 따라서 이 값은 2가 된다.

④ 관의 전체 길이와 밸브 비율(Length-Valve ratio)

$$LV_r = \frac{L_p}{n_V} \quad (6)$$

여기서, L_p : 관의 총 길이, n_V : 밸브의 총수

이 비율에 관한 특정된 값은 없으나 상수관망을 다루는 회사나 기관에서 자체적으로 정하고 있는 규약에 따라 달라질 것이다. AWWARF와 KIWA (2001)의 보고서에 따르면 일반적으로 상업용 지구의 경우 500ft

(약 150m), 기타 지역은 800ft (약 240m) 간격으로 밸브를 설치하도록 권장하고 있다. 하지만 T형, 십자형 부분과 같은 관 사이의 접합점(intersection)에는 추가적인 밸브가 설치되므로, 이상적 상수관망의 경우 이 범위의 값보다 작은 값을 가질 것으로 판단된다.

- ⑤ 밸브고장으로 인한 평균 영향(Average Impact of valve failure)

$$C_a = \frac{\sum_i (C_v)_i}{n_v} \quad (7)$$

여기서, C_v : 해당 밸브가 작동을 안 할 경우 추가로 영향을 받는 소비자의 수

- ⑥ Segment 격리의 평균 신뢰도(Average Reliability of isolating a segment)

$$RS_a = \frac{\sum_i (RIS)_i}{n_s} \quad (8)$$

여기서, RIS : Reliability of Isolating Segment, n_s : segment 의 총수

Segment 격리의 신뢰도는 segment를 격리하기 위해 닫혀야 하는 밸브의 총수로 결정되며, 만약 90%의 신뢰도를 가지는 4개의 밸브가 닫혀야 하면 Segment의 격리의 신뢰도는 $(0.9)^4 = 0.66\%$ 이다. 이상적인 상수관망의 경우 이 값은 (밸브의 신뢰도)² 이다.

- ⑦ Segment 에 포함되는 관의 평균 개수(Average number of pipes in a segment)

$$PS_a = \frac{\sum_i (NPS)_i}{n_s} \quad (9)$$

여기서, NPS : segment 내에 포함된 파이프의 수, n_s : segment 의 총수

이상적인 상수관망의 경우 각 Segment 는 1개의 관으로 이루어져야 하며, 이 값은 1이 된다.

4. 실제 상수관망에의 적용

제안된 기법의 적용성을 검토하기 위해 미국 코네티컷주에 위치한 Cherry Hill 상수관망에 적용 하였다. 대 상관망은 90개의 절점과 104개의 관, 94개의 밸브 그리고 2개의 수원으로 구성되어 있으며, 관경의 분포는 12,

8, 6인치 관으로 구성되어 있고 총연장은 68,192ft (20,784m)이다. 두 개의 수원은 한 개의 저수지와 탱크로 이루어져 있고, 각 절점 및 관거별 소비자의 수는 자료의 부족으로 각 절점의 용수량에 따른 가정치를 사용 하였다. 하지만 실제 상수관망의 경우 자체적으로 소비자 분포에 관한 자료가 있을 것이므로 이를 이용한다면 보다 정확한 소비자의 수를 파악할 수 있을 것이며 만약 특정 관에 병원이나 학교 등 공공시설물이 연결되어 있는 경우 이를 환산하여(equivalent customers) 사용할 수 있을 것이다.

Cherry Hill 관망에는 총 80개의 Segment로 이루어져 있으며, 이중에서 9개의 Node Segment 가 포함되어 있다. 9개의 Node Segment는 효율성 지수 계산에 사용되지 않았으며 71개의 일반 Segment만 이용되었다. Cherry Hill 상수관망의 자료는 관망해석 프로그램인 EPA-net의 입력 파일과 밸브의 위치를 표시한 shape 파일로 밸브의 위치를 찾아내기 위해서는 shape 파일 외에 도면이나 캐드 파일의 이용도 가능하다. 대형 상수관망의 경우 밸브의 개수가 많으므로 shape 파일을 이용하여 자동적으로 밸브의 위치를 검색하여 자료화 하는 것이 보다 유용할 것이다. 그림 9에는 대상관망에서 파이프와 밸브의 위치를 보여주고 있다.

4.1 선정결과

총 94개의 밸브 중에서 상위 5개의 밸브와 하위 4개의 밸브를 절점과 설치된 관의 기호를 사용하여 표 1에 나타내었다. 표 1을 살펴보면, 밸브(50, 54)가 고장일 경우 약 8%의 소비자가 영향을 받게 되어 최우선적으로 관리를 해야 하는 것으로 추천되었다. 가장 낮은 영향을 가진 밸브는 밸브(2, 61)로 0.6%의 소비자만이 영향을 받는 것으로 계산되었다. 이와 같은 방법을 통해서 밸브의 관리를 위한 우선순위를 제안하여 효율적인 밸브 관리에 이용할 수 있을 것이다.

4.2 상수관망의 효율성 지수 선정결과

표 2에서 Cherry Hill 상수관망에서 구해진 7개의 효율성 지수의 계산결과를 이상적 상수관망에서의 효율성 지수와 비교 하였다. 밸브의 위치와 수를 고려한 이상적 상수관망이란 관 파괴시 해당 관만이 차폐가 되는 상수관망이라 할 수 있다. 본 연구에서 밝힌 바와 같이 상수관 파괴시 차폐는 밸브의 잠금만으로 가능하며 파 괴된 관만이 차폐가 되어야만 상수관 파괴의 피해를 최소화 할 수 있다. 따라서 이상적 관망에서는 모든 관에 두 개 이상의 밸브가 설치되어야 한다. 이를 효율성 지수중의 하나인 관 당 평균 밸브의 개수로 나타내면

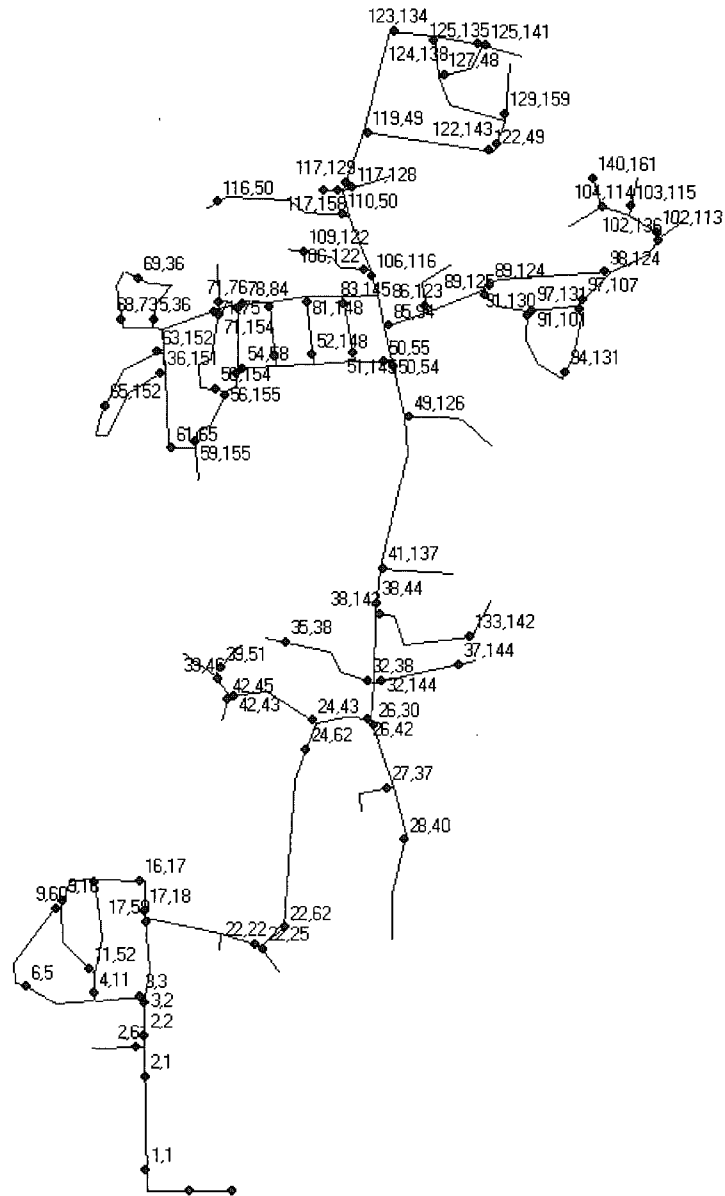


그림 9. Cherry Hill 상수관망 및 밸브의 위치

표 1. Cherry Hill 관망의 VII 산정 결과

Valve_ID	Node_ID	Pipe_ID	Customers	VII*	Rank Order
50,54	50	54	730	7.82%	1
50,55	50	55	568	6.08%	2
38,44	38	44	548	5.87%	3
49,126	49	126	542	5.80%	4
136,151	136	151	529	5.66%	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
39,46	39	46	96	1.03%	91
42,45	42	45	82	0.88%	92
2,2	2	2	75	0.80%	93
2,61	2	61	55	0.59%	94

주) 총 소비자수 : 9339명

표 2. Cherry Hill 상수관망의 효율성 지수 산정 결과

효율성 지수	단 위	Cherry Hill	Ideal System
Segment의 평균길이	길이/Segment	960.45 (ft)	655.69 ⁽¹⁾
관 당 평균 밸브의 개수	밸브/관	0.90	2.00
한 Segment를 격리하기 위한 평균 밸브의 수	밸브/Segment	2.45	2.00
관의 전체 길이와 밸브 비율	길이/밸브	725.43	327.85 ⁽²⁾
밸브고장으로 인한 평균 영향	소비자수/밸브	281.70 (명)	-
Segment 격리의 평균 신뢰도	Per Segment	0.78	0.81 ⁽³⁾
Segment에 포함되는 관의 평균 개수	관/Segment	1.46	1.00

- (1) (총 관길이)/(이상적인 Segment 수, 즉 총 관갯수) = 68192 / 104
 (2) (총 관길이)/(이상적인 밸브의 수, 즉 총 관갯수*2) = 68192 / 208
 (3) 밸브의 신뢰도를 90%로 가정

2.00이 될 것이다. 이에 반해 Cherry Hill 상수관망의 경우 관당 밸브의 수가 0.9로 계산되었으며 이에 따라 다른 효율성 지수가 영향을 받아서 이상적인 상수관망에 비해 효율성이 떨어지는 것으로 생각된다. 추가적인 밸브의 도입과 함께 기존 밸브의 적절한 관리를 통해서 효율성을 높여야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

부분적인 상수관망 격리는 밸브를 사용하여야만 이루어질 수 있으며, 이러한 부분적인 격리는 관 파괴나 상수관의 유지 보수 활동을 위하여 필수적이다. 본 논문에서는 Walski (1993)에 의하여 제안된 segment 개념을 도입하여 기존의 link-node 가정보다 현실에 가까운 방법으로 상수관망을 해석할 수 있었다. 또한, segment 개념을 실제 상수관망에 쉽게 적용할 수 있도록 Matrix Algorithm을 제안하였고, segment를 바탕으로 효율적인 밸브의 유지보수를 위해 사용될 수 있는 VII (Valve Importance Index)와 객관적인 상수관 효율성 평가에 사용될 수 있는 7개의 효율성 지수를 제시하였다.

제안된 알고리즘과 효율성 지수를 실제 상수관망에 적용하여, 효율적인 밸브 유지보수를 위한 밸브 상호간의 중요성 정도를 제시하였고 전체 상수관망을 대상으로 계산된 7개의 효율성 지수를 이상적인 상수관망에서의 효율성 지수와 비교하여 현재 상수관망의 상태를 객관적으로 평가할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 미국 AWWARF 2869 사업의 일환으로

시행되었으며 실제 상수관망의 자료를 제공하여 준 Dr. Walter Greyman 그리고 효율성 평가지수를 산정하는데 많은 도움을 준 Dr. Arun Deb께 감사드립니다.

참 고 문 헌

성창환, 박남식, 김상현, 김주환 (1999). “밸브의 최적 조절에 의한 관로 시스템에서의 누수분석”, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, Vol. 1999, No. 3, pp.201-204.

이경훈, 오창주, 강용덕 (2001). “관망제어를 위한 밸브 탐색 알고리즘”, **상하수도 학회지**, 15권 3호, pp.222-228.

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.

Deb, A. K. (1994). “Water Distribution System Performance Indicators.” *Water Supply*, Vol. 12, No. 3-4, pp. 11-20.

Deb, A. K., Hasit, Y. J., and Grablutz, F. M. (1995). “Distribution System Performance Evaluation.” *AWWA Research Foundation and American Water Works Association*.

Hoff, J.W. (1996). “Maintenance requirements of valves in distribution systems.” *Annual conference proceedings AWWA, June 23-27, Toronto, Ontario, Canada*.

KIWA and AWWARF (2001) "Key Criteria for Valve Operation and Maintenance." *AWWARF and KIWA*.

Shea, S.(1991). "Valve Maintenance in Boston." *Resources Engineering and Operations for the New Decades, 1991 Annual Conference Proceedings, AWWA*, pp. 561-566.

Walski, T.M. (1993)a. "Practical aspects of providing reliability in water distribution systems."

Reliability Engineering and System Safety, Vol. 42, pp. 13-19.

Walski, T.M. (1993)b. "Water distribution valve topology for reliability analysis." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 42, pp. 21-27.

(논문번호:05-43/접수:2005.3.8/심사완료:2005.06.22)