

## 상수관로와 밸브 파괴모의를 기반으로 한 다른 제수밸브 분포간의 우열성 평가방법

### A Methodology for Evaluating the Superiority between Different Valve Distributions Based on Pipe and Valve Failure Simulation

전 환 돈\* / 박 수 완\*\*

Jun, Hwandon / Park, Suwan

#### Abstract

For a water distribution system, it is necessary to evaluate the superiority between different valve distributions in order to improve the reliability of the water distribution system. In cases of placing more valves to an existing system or building a new system, we suggest a methodology to select a proper valve distribution after various valve distributions are compared. The suggested methodology is based on simulations of pipe and valve failures to estimate failure impacts of the water distribution system due to pipe and valve failures. It is quantified by the number of customers out of service per pipe failure resulted from pipe and valve failures. To demonstrate its applicability, the methodology is applied to a real water distribution system with two different valve distributions and determines the superiority between those valve distributions. Also, customers out of service along with various valve reliabilities are estimated for those valve distributions to prove the effect of the valve reliability on the reliability of a water distribution system.

**keywords** : valve distribution, on-off valves, failure simulation, water distribution system reliability

#### 요 지

상수관망에서 다양한 제수밸브 분포간의 우열성 평가는 상수관망의 신뢰성 확보를 위해 필수적이다. 기존 상수관망에 새로운 제수밸브를 추가할 경우나 새로운 상수관망을 건설할 경우, 본 연구에서는 서로 다른 제수밸브 분포간의 우열성을 평가하여 좀 더 효율적인 제수밸브 분포를 선택할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 제안된 방법은 상수관 및 제수밸브의 파괴 모의를 바탕으로 하며 제수밸브 분포간의 우열성은 상수관망의 신뢰도를 기준으로 하였다. 상수관망의 신뢰도는 상수관 파괴당 평균적인 단수인구로 나타내지며 충분한 횟수의 상수관 및 제수밸브 파괴모의를 통해서 산정하였다. 제안된 방법의 적용성을 평가하기 위하여 실제 상수관망을 대상으로 새로운 제수밸브를 추가할 경우 두가지 다른 밸브분포를 결정한 후 우열성을 판별하였다. 또한 다양한 제수밸브 신뢰도에 따른 관파괴당 평균단수인구를 산정하여 제수밸브 신뢰도가 상수관망의 신뢰도 향상에 미치는 영향을 검증하였다.

**핵심용어** : 밸브분포, 제수밸브, 파괴모의, 상수관망, 신뢰성

\* 고려대학교 공과대학 BK21건설사업단 연구전임강사

Research Associate, BK21 Global Readers in Construction, Korea University (e-mail: hwandonjun@korea.ac.kr)

\*\* 부산대학교 사회환경시스템공학부 조교수

Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Pusan National University (e-mail: swanpark@pusan.ac.kr)

## 1. 서론

도시화에 따른 안정적인 용수공급 필요성의 증대로 많은 도시에 상수관망이 매설되었으며 새로운 주거단지 및 산업단지의 증가로 기존 상수관망에 추가로 상수관망이 매설되고 있다. 매설된 상수관은 매설과 동시에 주변 영향으로 노후화 과정을 겪게 되며 상수관의 노후화로 인한 가장 큰 문제점은 상수관의 파괴가능성이 높아짐을 들 수 있다. 상수관망에서 상수관이 파괴되면 파괴된 상수관을 보수 또는 교체를 하여야 하며 이를 위해서 상수관망의 일부를 격리(isolation) 하여야 하며, 이는 인접한 제수밸브를 닫음으로써 이루어진다. 그러나 제수밸브가 격리하고자 하는 영역에 적절히 배치되어 있지 않은 경우 필요한 부분보다 많은 영역이 격리되게 되며, 결과적으로 격리로 인한 피해범위를 증가시키게 된다. 이렇게 적절히 배치되지 못한 제수밸브로 인해서 상수관 파괴에 따른 평균단수인구의 수가 커지게 되며 상수관망의 전체적인 신뢰성이 낮아진다. 따라서, 적절히 배치된 제수밸브는 상수관 파괴에 따른 평균단수인구를 감소시킴으로써 상수관망의 신뢰성 제고에 중요한 역할을 한다.

제수밸브의 적정 분포성과 더불어 개개 제수밸브의 신뢰성 또한 상수관 파괴에 따른 피해 저감에 중요한 역할을 한다. 즉, 밸브를 차폐하려 할 때 작동을 하지 않게 되면 인접 제수밸브를 추가로 차폐해야 하며 이는 추가적인 단수영역을 발생시킨다. 일반적으로 상수관망에 설치된 제수밸브는 오랜 기간 동안 운용이 되지 않는 경우가 많게 되며 차폐시 정확하게 작동을 하지 않을 수 있다. 2001년 KIWA와 AWWA의 보고서(AWWA와 KIWA, 2001)에 의하면 약 4.1%의 제수밸브가 다양한 이유로 작동하지 않았다. 외국에 비해 도시환경의 변화가 크고 적절한 제수밸브관리 프로그램이 시행되지 않는 국내 실정도 비슷할 것으로 생각된다. 제수밸브 오작동의 경우에도 주변 제수밸브가 적절하게 배치되지 않은 경우 더 많은 영역이 추가적인 제수밸브의 차폐로 인하여 단수가 되게 된다. 이러한 제수밸브 차단실패에 따른 추가적인 인접 제수밸브의 차폐와 이에 따른 피해 영역 증가로 인한 영향은 전환돈(2005, 2006)에 자세히 분석되었다. 따라서 제수밸브의 적절한 배치의 결정은 상수관 파괴에 의한 피해영역의 감소뿐 아니라 제수밸브의 오작동으로 인한 추가 단수영역의 감소에도 중요한 영향을 미친다.

본 연구에서는 상수관 및 제수밸브의 파괴모의를 통하여 동일한 수의 제수밸브를 다양하게 분포시켜서 제수밸브 분포 상호간의 우열성을 판정하여 적절한 제수

밸브의 분포를 결정할 수 있는 방안을 제시하고자한다. 제시된 방법은 상수관 파괴 및 이에 따른 제수밸브 오작동을 충분한 횟수로 모의(simulation)하여 상수관 파괴당 평균 단수인구 (Average Number of Customers Out of Service per Pipe Failure, 이하 ANCOSPF)를 기준으로 사용하였다. 1회 상수관 파괴 모의시 발생하는 단수인구는 (전환돈, 2006)에서 제시된 네가지 기준을 이용하여 구하였다. 즉, 파괴관, segment (Walsk, 1993a and 1993b, 비의도적 구역고립(unintended isolation, 전환돈(2006)), 그리고 수압저하영역(전환돈, 2006)에 포함된 모든 단수인구를 합산하였다. 기존의 상수관망의 신뢰성 산정 연구는 주로 특정 지점 또는 상수관망의 일부가 수리학적인 조건이나 상수관망 각 요소의 성공적인 운영확률을 바탕으로 하였으나 (Goulter *et al.*, 1986; Su *et al.*, 1987; Bao *et al.*, 1990; Mays, 2004), 본 연구에서는 이러한 확률이 아닌 평균 단수인구수로 한 것이 다른 점인데, 이러한 차이는 본 논문의 방법론이 상수관이 파괴된 후를 모의하고 그에 따른 제수밸브의 파괴를 분석하는 모의 방법을 사용하기 때문이다. 즉, 기존의 연구에서는 상수관 또는 상수관망 구성요소의 파괴확률을 고려하나 본 연구에서는 파괴가 발생하였다고 가정하고 그에 따른 피해범위의 결정과 제수밸브 오작동 유무에 따른 추가적인 피해범위를 단수인구수로 환산하여 상수관망의 신뢰성 평가지표로 활용하였다.

제수밸브와 상수관망 신뢰성의 상관관계에 관한 기존의 연구를 간략하게 살펴보면, 먼저 상수관망에서 제수밸브를 최적으로 배치시키기 위한 방법론에 관한 연구를 들 수 있다. 이에 관한 연구로 대표적인 것으로 Bouchart 와 Goulter (1991), Reis 등 (1997), Ozger (2003), 및 Araujo 등 (2006)이 있다. 이들은 누수량을 최소화 하는 제수밸브의 최적배치를 결정하는 방법을 제시하였다. 그러나 본 연구에서는 제수밸브 최적배치를 결정하는 방법이 아니며 이미 결정된, 즉 현재 운영되고 있는 상수관망에 배치되어 있는 제수밸브 또는 가설계된 제수밸브의 분포와 같이 결정된 제수밸브 분포의 우열관계를 판별하는 것이다. 물론 이를 이용하면 같은 수의 제수밸브를 다른 방법으로 분포시킨 후 제수밸브 분포간의 우열을 판별할 수 있으므로 제수밸브 분포의 최적화에 사용할 수 있을 것이나, 본 연구에서는 주어진 다양한 제수밸브 분포간의 우열성을 판별을 위한 방안으로 한정한다.

1회의 상수관 파괴모의 및 이에 따른 단수인구 산정을 위해서 필요한 알고리즘은 segment finding (전환돈, 2005), unintended isolation searching (전환돈, 2006),

hydraulic failure range (전환돈, 2006) 및 on-off valve searching 알고리즘(전환돈, 김중훈, 2006) 등이 사용되었으며 이와 같은 알고리즘을 통합한 상수관 파괴 및 제수밸브 오작동의 모의모듈이 개발되었다.

제안된 방법의 적용성을 평가하기 위해서 적용대상 관망을 결정한 후 기존의 제수밸브에 동일한 수의 제수밸브를 추가로 배치한다고 가정하여 두가지의 다른 방법으로 제수밸브를 추가로 분포시킨 후, 각각에 대하여 제안된 상수관 파괴 및 제수밸브 오작동의 모의를 이용, 분포간의 적정성을 정량화하여 우열을 판별하였다. 또한 동일한 제수밸브 분포에서 제수밸브의 평균신뢰도를 50%에서 95%까지 다양하게 적용하여 제수밸브의 신뢰도가 상수관망 전체의 신뢰도에 미치는 영향을 정량화하여 보여주었다.

## 2. 본 론

### 2.1 상수관망의 부분적 격리 과정 및 피해영역

상수관망의 부분적 격리는 상수관망의 유지보수 또는 상수관의 파괴시 관로의 수리를 위해 반드시 필요하다. 상수관망의 유지보수를 위한 관로의 격리는 예측이 어려운 상수관의 파괴와 달리 적절한 계획에 의해 미리 알려진 시점에서 수행된다는 점이 관로의 파괴로 인한 격리와 다른 점이긴 하나, 전체 상수관망에 미치는 영향은 관로의 파괴로 인한 격리와 동일하다. 따라서 본 논문에서 개발된 방법론은 비단 상수관의 파괴시에만 적용할 수 있는 것은 아니며, 상수관망의 유지관리작업에 따른 상수관망의 신뢰도 산정에도 적용될 수 있다.

상수관망 전체로 볼 때 상수관 파괴는 상수관망의 모든 영역에서 발생하며 상수관 각각의 파괴확률은 독립적이며 다음번 파괴가 될 상수관을 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 상수관이 파괴되면 작업인부들이 현장에서 파견되어 해당 상수관을 격리한다. 격리에 필요한 제수밸브의 수와 위치는 도면확인 등의 작업을 통해 이루어진다. 만약 필요한 제수밸브 전부를 성공적으로 차단할 경우 파괴된 상수관 또는 상수관망의 일부는 나머지 상수관망으로부터 격리가 되며 격리된 부분의 급수인구는 단수가 된다. 만약 차단되어야 할 제수밸브 중 한 개의 제수밸브라도 차단되지 않을 경우 파괴된 상수관을 격리하기 위해서는 인접 제수밸브를 추가로 차단해야 한다. 추가된 제수밸브가 전부 작동을 하면 처음의 상수관과 더불어 인접 상수관들이 함께 격리되며 격리된 부분의 급수인구는 모두 단수가 된다. 이러한 과정은 이론적으로 한 개의 제수밸브라도 작동이 되지 않으면 계속해서 인접 제수밸브를 차단하여야 하며,

필요한 모든 제수밸브가 작동될 때까지 이러한 추가적인 제수밸브 차단이 계속되어야 한다. 위의 과정에서 중요한 것은 각각의 제수밸브는 독립적으로 작동유무가 결정되며 각 제수밸브의 작동유무는 차단을 위해서 작동시키기 전까지는 알 수 없다는 점이다. 파괴된 상수관이 격리되고 수리가 완료된 후 수리된 관로의 정상적인 작동을 위해 닫혔던 모든 제수밸브는 다시 열려지게 되고 상수관망은 다시 정상상태로 운영될 수 있다. 한편 노후된 상수관망에서는 상수관의 파괴가 지속적으로 발생하므로 이와 같은 과정은 반복적으로 수행되어야 한다.

이러한 제수밸브와 상수관망의 부분적 격리로 인한 상수관망의 신뢰도 문제는 Walski (1993a and 1993b)에 의해서 "segment" 개념의 도입으로 설명되었는데, 상수관망을 부분적으로 격리(segment) 할 때 격리되는 단수영역 이외에 상수관망의 형태(network topology)에 따라서 추가적인 단수영역이 발생할 수 있으며 이러한 현상은 수지형 관망(branch network)에서 많이 발생한다. 즉, 격리되는 segment가 수원(水原)으로부터 하류지역의 유일한 용수공급선(water path)인 경우 해당 segment의 격리에 따라 하류지역 전체가 단수되게 된다. 전환돈(2006)은 이러한 영역을 비의도적 구역고립(unintended isolation)으로 정의하였으며 segment별로 비의도적 구역고립을 결정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 비의도적 고립영역은 제수밸브에 의해서 직접적으로 격리되는 영역(subsystem)은 아니지만 단수가 된다는 점에서 상수관 파괴의 피해산정에 포함되어야 한다. 또한 이러한 격리영역으로 인하여 새로이 조성된 수리조건하에서 일부 지역에서는 수압이 저하될 수 있는데, 수압저하는 원활한 용수사용을 어렵게 할 수 있으므로 수압이 저하되는 지역을 격리영역에 따른 피해영역으로 간주하여 전체적인 피해영역 산정에 포함하여야 한다.

### 2.2 제안된 제수밸브 분포간의 우열성 정량화

제안된 제수밸브 분포간의 우열성을 정량화하기 위한 방법론은 상수관망에 설치되는 제수밸브의 배치 방안이 상수관망을 이용한 용수공급에 미치는 영향을 산정하기 위한 방법론으로서, 이 방법론은 장기간에 걸쳐서 상수관망에 나타날 수 있는 상수관로의 다양한 파손 사건을 모의하고, 그에 따른 관망 내에서의 제수밸브의 분포에 따른 단수인구를 비교하여 제수밸브의 배치 방안의 우열성을 정량화하는 것을 기본 골자로 한다. 제수밸브가 배치된 형태에 따른 단수인구의 변화는 본 논문의 서론에서 밝힌 바와 같이 관로 파손 또는 유지관

리 목적에 의한 관로의 격리와 관련이 있다. 따라서 상수관망에 설치된 제수밸브가 적절히 배치되었다면 관로 파손에 따른 장기간에 걸친 평균적인 단수인구의 수는 제수밸브가 적절히 배치되지 않은 경우에 비해 동일한 관로 파손횟수가 대해 더 큰 값을 가질 것으로 예상할 수 있다. 이와 같은 가정을 바탕으로 충분한 횟수의 상수관로의 파괴를 모의하고 이에 따른 평균단수인구를 제수밸브 분포의 적정성의 정량화 지수(index)로 이용하였다.

1회의 상수관 파괴 모의는 실제 상수관망에서 상수관 파괴의 발생시점부터 격리까지의 모든 과정을 모의한다. 또한 무작위로 발생하는 상수관 파괴와 이에 따른 각 제수밸브의 작동유무도 함께 고려하여 모의하였다. 1회의 상수관 파괴 모의시 파괴되는 상수관은 1개이며 복수의 상수관 파괴는 고려하지 않았다. 이는 복수의 상수관이 동시에 파괴될 확률이 매우 낮아서(Su et al., 1987; Mays, 1996) 지진과 같은 천재지변을 제외한 일반적인 경우 복수의 관로가 동시에 파괴되는 현상은 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 1회 상수관 파괴 모의는 격리에 필요한 모든 제수밸브가 작동을 하여 파괴된 영역이 격리되는 시점에서 종료되며 매회 모의는 정상상태의 상수관망에서 시작된다. 즉, 1회 모의가 끝나면 파괴된 상수관은 복구가 되어 운영되며 작동하지 않는 제수밸브는 수리를 하여 정상적으로 작동이 된다고 가정하였다. 단수인구 산정을 위한 상수관 파괴의 1회 모의는 다음의 과정으로 진행된다.

- Step 1: 난수를 이용 파괴 예상 상수관 선정
- Step 2: 차폐되는 상수관의 범위 결정  
(segment finding algorithm)
- Step 3: 격리에 필요한 제수밸브 선정  
(on-off valve searching algorithm)
- Step 4: 선정된 제수밸브 별로 난수를 이용, 작동 유무 결정
- Step 5: 차폐를 하지 못하는 제수밸브가 발생될 경우 차폐해야 할 인접 제수밸브 선정
- Step 6: 모든 제수밸브가 작동하여 파괴된 상수관이 차폐되면 segment 내 단수인구 결정
- Step 7: 격리된 범위를 바탕으로 비의도적 구역고립 발생 유무 결정 (unintended isolation searching algorithm)
- Step 8: 비의도적 구역고립 내 단수인구 결정
- Step 9: 수압저하에 따른 단수영역 유무 결정  
(hydraulic failure range searching algorithm)
- Step 10: 총 단수인구 산정

## Step 11: 상수관망의 정상화

Step 1은 파괴가 예상되는 상수관을 선정하기 위한 과정으로서 대상 상수관망에서 상수관 마다 적용할 적절한 파괴확률 자료가 부족하여 모든 상수관이 동일한 파괴확률을 가진다고 가정하여 uniform distribution을 사용하여 난수를 발생시켰다. 상수관마다 추가로 자료가 확보되면 상수관마다 다른 파괴확률을 부여할 수 있을 것이다. 난수는 0에서 1사이의 값을 Eq. (1)을 사용하여 파괴 대상 상수관을 선정하였다.

$$FailedPipeNo = cInt(RND \times noPipe) \quad (1)$$

여기서, *FailedPipeNo*는 파괴가 예상되는 관의 번호, *cInt*는 계산값을 정수화시키는 함수, *RND*는 발생된 0에서 1사이의 난수, *noPipe*는 상수관의 총갯수를 나타낸다. 예를 들어 상수관이 200개이고 발생된 난수가 0.32333 인 경우  $200 \times 0.32333 = 64.6666$  이며 정수화가 되면 65가 되어 65번째 상수관이 파괴 상수관으로 선정된다. 발생된 난수에 따라서 상수관 파괴 모의를 계속할 경우 특정관에서 발생하는 파손사건이 1회 이상이 될 수 있으므로, Eq. (1)을 이용한 상수관 파괴 모의는 특정 관로의 파손확률이 다른 관에 비해 상대적으로 높을 수 있는 실제 상수관망에서의 파손 양상에 부합한다고 볼 수 있다.

Step 2 및 3는 파손이 예상되는 관로를 격리시키기 위해 차폐되어야 할 관로의 범위를 결정하고 이러한 관로들을 격리시키는데 사용되는 제수밸브를 선정하기 위한 과정으로서 전환돈(2005)의 segment finding algorithm과 전환돈 등(2006)의 on-off valve searching algorithm을 사용하였다.

Step 4는 선정된 제수밸브의 작동유무를 모의하기 위한 과정으로서 먼저, 각 제수밸브의 신뢰도를 부여한다. 개개 제수밸브의 신뢰도는 자료의 부족으로 구하기 어려워서 전체 제수밸브에 동일한 신뢰도를 가정하여 이를 부여한다. 차폐를 위해 필요한 제수밸브가 결정되면 각 제수밸브 별로 0과 1사이의 난수를 발생시켜서 이 값이 부여된 제수밸브 신뢰도 보다 클 경우 해당 밸브는 오작동으로 간주한다. 예를 들어 부여된 제수밸브 신뢰도가 90%인 경우 발생된 난수가 0.9보다 크면 오작동, 0.9보다 작으면 작동하는 것으로 모의한다.

하나의 제수밸브 분포 방안에 대한 모의는 위에서

설명된 1회의 상수관 파괴 모의 과정을 충분히 발생가능한 모든 상수관 파괴양상과 이에 따른 제수밸브 오작동을 모의하는 것으로서, 상수관 파괴모의 종료 조건은 상수관 파괴당 평균 단수인구가 일정치 내에서 수렴할 때 종료하는 것으로 하였다. 최소 상수관 파괴모의 횟수는 1000회로 선정하였다. 상수관 파괴당 평균 단수인구는 관파괴 모의에 따른 총 단수인구를 관파괴 횟수로 나눈 것으로 1회 관파괴가 발생할 때 예상되는 평균 단수인구이다. 1000회의 모의를 통해 산정된 상수관 파괴로 인한 평균 단수인구를 구한 후 추가로 100회 모의를 실시하여 1000회 모의에서 구해진 상수관 1회 파괴당 평균단수인구수와 1100회 모의에서 구해진 상수관 1회 파괴당 평균단수인구수가 1%이내 이면 관파괴 모의를 종료하는 것으로 했으며 1%보다 차이가 크면

추가로 100회 실시하여 1100회와 1200회에서 각각 구해진 상수관 1회 파괴당 평균단수인구수를 다시 비교하는 과정으로 수렴조건을 만족여부를 평가하였다. 상수관망의 규모가 클 경우에 안정된 종료 조건을 얻기 위해서는 더욱 많은 횟수의 상수관 파괴모의가 필요할 것으로 사료된다. Fig. 1은 위에서 설명된 1회의 상수관 파괴 모의 과정에 기초한 하나의 제수밸브 분포에 대한 모의 과정에 대한 흐름도를 나타낸다.

### 2.3 실제 상수관망에 적용

제안된 방법론의 적용성을 검토하기 위해 실제 운용 중인 미국 코네티컷주에 위치한 Cherry Hill 상수관망을 적용 대상 상수관망으로 선정하였다. 대상관망은 Fig. 2에 보인 바와 같이 90개의 절점과 104개의 관, 94개

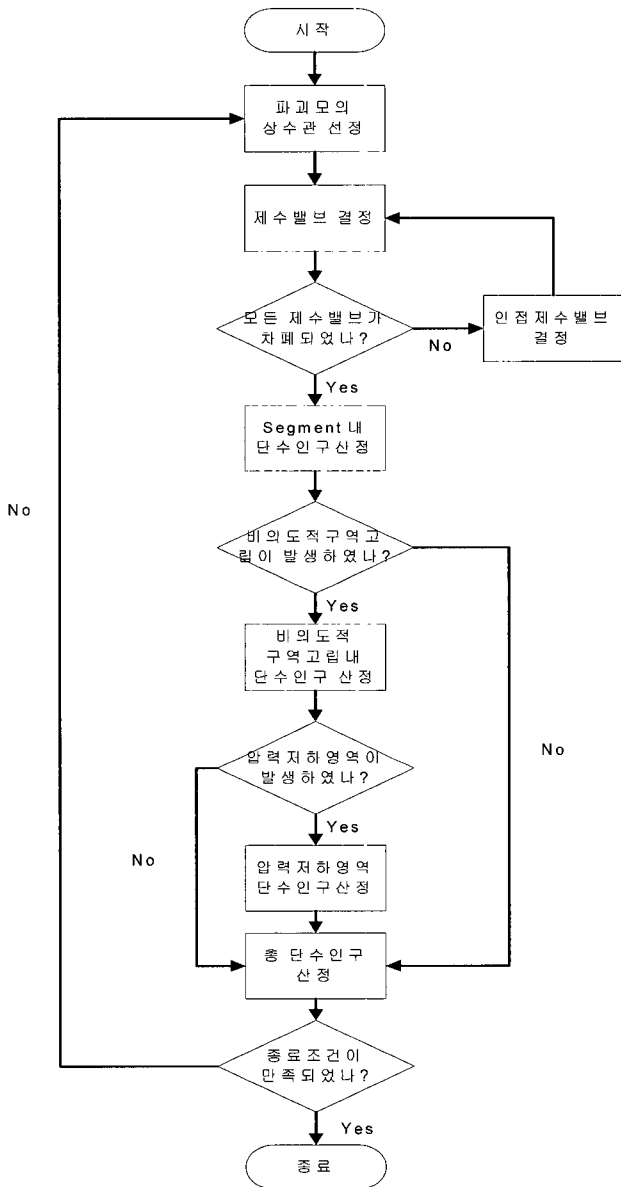


Fig. 1. Flow chart of the simulation

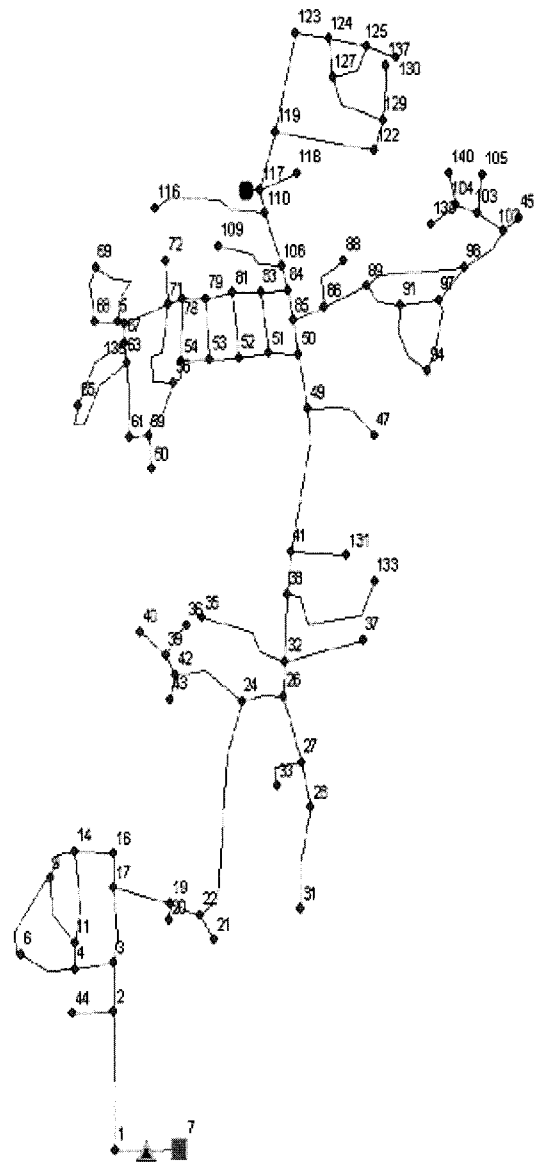


Fig. 2. Cherry Hill Network

의 제수밸브 그리고 2개의 수원으로 구성되어 있으며 관경의 분포는 300mm, 200mm, 150mm으로 구성되어 있고 총연장은 20,784m이다. 두 개의 수원은 한 개의 저수지와 탱크로 이루어져 있으며, 각 절점 및 관거별 소비자의 수는 자료의 부족으로 각 절점의 용수량에 따른 가정치를 사용하여 구하였으며 9339명으로 계산되었다.

대상 상수관망에서 제수밸브 분포간의 우열성을 산정하기 위하여 기존의 상수관망도에서 제공된 제수밸브 외에 23개의 추가적인 제수밸브 분포를 구성하였다. 추가되는 23개의 제수밸브를 두 가지 다른 방법으로 분포시킨 후 각각에 대하여 상수관 파괴당 평균 단수인구를 구하였다. 본 연구에서 두 가지 분포 방법으로 제수밸브를 분포시킨 후 각각의 상수관 파괴당 평균단수인구를 구하여 비교한 이유는 중요지점 분석을 통해 결정된 제수밸브 분포와 그렇지 못한 제수밸브 분포를 비교하여 제안된 방법의 적용성과 제수밸브 분포의 중요성을 보여주기 위함이다. 이와 함께 제수밸브의 신뢰도를 50%에서 90%까지 변화시켜 각 제수밸브 분포에 대하여 상수관 파괴당 평균 단수인구를 계산하였다. 이와 같이 다양한 제수밸브의 신뢰도를 가정하여 동일한 제수밸브 분포에서 제수밸브의 신뢰도에 따른 상수관 파괴당 평균 단수인구의 차이를 구하여 제수밸브의 신뢰도가 상수관 파괴에 따른 피해에 미치는 영향을 산정하였다.

추가된 제수밸브를 분포시키기 위한 첫 번째 방법은 대상 상수관망을 각 관에 흐르는 유량과 관의 연결형태(연결된 관의 수나 직경등)를 분석하여 23개의 중요지

점을 선정하여 분포시켰다. 이를 위하여 GIS 위치정보와 상수관망의 수리해석결과를 이용하여 관에 흐르는 유량과 연결관의 수를 구하였다. 두 번째 제수밸브 분포는 컴퓨터 프로그램을 통해서 임의로 23개의 지점을 선정하여 분포시켰다. 임의분포에서 새로이 추가되는 제수밸브의 위치는 제수밸브가 설치될 수 있는 위치는 동일한 선정확률을 가지고 위치에 대한 아무런 정보없이(즉, 흐르는 유량 또는 연결된 관의 수등) 단지 위치가 어디인지만 아는 상태에서 프로그램이 임의선정을 하도록 하였다. 두 가지 방법으로 분포된 23개의 제수밸브는 Table 1에 나타내었다. 제수밸브는 V(절점, 관)로 표시되었다. 예를 들어 V(3, 59)는 관(59)상에 절점(3) 옆에 배치된 제수밸브를 의미한다. 선정된 제수밸브 중 두 가지 분포방법 모두에 선택된 것은 V(3,59), V(26,35), V(78,83), V(97,101), V(117,127), V(127,138)의 6개이다.

상수관 파괴모의 횟수는 두 가지 제수밸브 분포 모두 1100회에서 종료되었다. 이는 전체 상수관이 104개이기 때문에 1000회 이상의 상수관 파괴모의가 안정된 결과를 얻기에 충분한 모의횟수이기 때문인 것으로 생각된다. 이때 중요한 점은 Step 1에서 설명된 바와 같이 모든 상수관이 동일한 횟수로 파괴되는 것이 아니고 무작위 선정과정에서 특정관은 다른 관에 비해서 더 많이 파괴되는 상수관으로 선정될 수 있는 것이다. 두 가지 다른 제수밸브 분포에 의한 상수관 파괴모의 결과는 Table 2에 나타나 있다. 두 가지 분포에 의한 결과를 비교하면 중요지점에 의한 제수밸브의 분포가 약 26%에서 15%까지 상수관 파괴당 평균 단수인구가 작아지

Table 1. Twenty Three locations of new valves selected by the methods of valve distribution

Methods of distribution	Valve Locations
Based on the important locations	V(3,59), V(11,11), V(20,23), V(26,35), V(32,41), V(38,41), V(42,46), V(49,157), V(50,93), V(52,56), V(54,146), V(63,71), V(71,83), V(78,83), V(81,90), V(85,93), V(89,97), V(97,101), V(103,114), V(110,127), V(117,127), V(119,133), V(127,138),
Randomly distributed	V(3,59), V(4,3), V(5,4), V(14,16), V(17,21), V(26,35), V(36,51), V(40,47), V(45,132), V(51,55), V(56,150), V(53,57), V(61,67), V(78,83), V(79,87), V(84,92), V(97,101), V(98,136), V(117,127), V(118,128), V(124,134), V(127,138), V(129,143)

Table 2. The number of customers out of service per pipe failure according to the methods of valve distribution and valve reliability (person)

Valve reliability	Based on the important locations	Randomly distributed	difference (%)
50%	1004	1228	22.4%
60%	716	881	23.1%
70%	510	642	26.0%
80%	380	455	19.9%
90%	301	348	15.9%

Table 3. Descriptive statistics for the number of customers out of service per pipe failure

Valve reliability	Based on the important locations				Randomly distributed			
	Mean	Standard Deviation	Lower Confidence Interval	Upper Confidence Interval	Mean	Standard Deviation	Lower Confidence Interval	Upper Confidence Interval
50%	1004	37.0	993	1014	1228	46.6	1215	1241
60%	716	25.5	709	723	881	28.2	873	889
70%	510	20.0	504	515	642	29.6	634	650
80%	380	12.6	376	383	455	19.0	450	460
90%	301	9.3	298	303	348	14.8	344	355

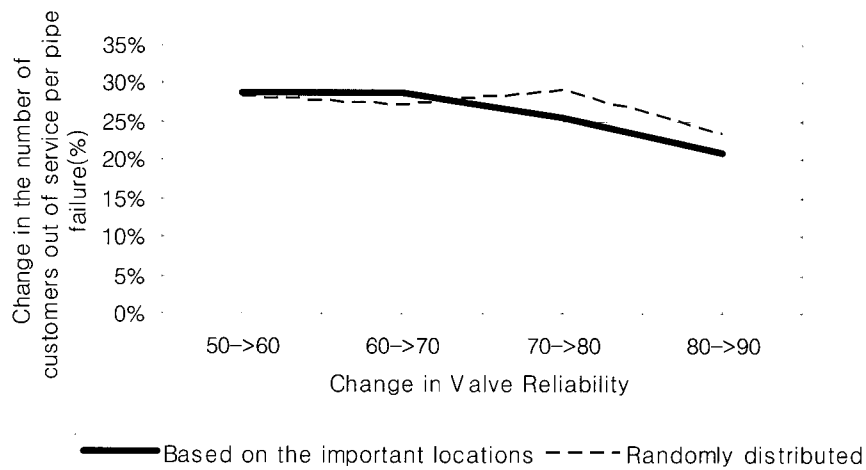


Fig. 3. 제수밸브 신뢰도 증가에 따른 상수관 파괴당 평균단수인구의 변화

는 것으로 분석된다. 따라서 대상 상수관망에서 같은 수의 제수밸브를 새로이 설치할 때 단지 분포방법의 차이로 평균 단수인구로 정량화된 상수관 파괴에 따른 피해 정도를 상수관망 전체에 대해서 약1/5정도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

또한 Fig. 3에 보인 제수밸브 신뢰도에 따른 분석결과, 같은 수의 제수밸브 분포에서 제수밸브의 신뢰도가 증가할수록 두 가지 제수밸브 배치 방법 모두에서 상수관 파괴당 평균 단수인구가 감소하는 것을 알 수 있으며, 따라서 제수밸브 신뢰도의 향상은 상수관망 전체 신뢰도의 향상에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. 따라서 상수관망의 관리자는 적절한 계획을 통하여 제수밸브의 신뢰도를 높이는 제수밸브 유지관리 사업을 지속적으로 수행할 필요가 있다. 설치된 제수밸브의 전반적인 신뢰도는 효율적이며 장기적인 제수밸브 관리 프로그램에 의해서 달성될 수 있다. 그러나 제수밸브 관리를 위해서는 인력과 비용이 필요하므로 달성하고자

하는 제수밸브 신뢰도의 정도에 따라서 투입되는 인력과 비용은 달라지게 된다. 그러므로 투입되는 인력과 비용대비 상수관망의 신뢰도의 향상치를 산정하여 적절한 투자가 이루어지게 하는 것이 중요하다.

### 3. 결론

상수관망에서 관로의 파괴나 유지보수를 위한 관망 내 일정 부분의 격리는 피할 수 없는 문제이다. 관망 내 일정부분의 격리를 위해서 적절히 배치된 제수밸브는 단수에 의한 피해범위를 최소화 할 수 있으며 이는 전체 상수관망의 신뢰성 제고에 도움이 된다. 본 연구에서는 제수밸브 분포간의 우열성을 판별할 수 있는 상수관 파괴 및 제수밸브 오작동의 모의를 바탕으로 한 기법을 제시하였으며, 제시된 모의기법을 실제 상수관망에 적용하여 그 적용성을 검증하였다. 적용 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기존 상수관망에 두가지 다른 방법으로 제수밸브

를 분포시킨 결과 중요지점을 선정하여 분포시킨 것이 임의의 지점으로 분포시킨 방법에 비하여 약 20%정도 적은 평균 단수인구수를 보였다. 이는 같은 수의 제수밸브를 분포시킬 경우 적절히 배치된 제수밸브가 그렇지 않은 경우에 비해서 전체적인 상수관망의 상수관 파괴 및 제수밸브 오작동에 의한 피해를 감소시킬 수 있음을 나타내며 제수밸브 분포의 중요성을 입증한다 할 수 있다.

- 2) 제수밸브의 전반적인 신뢰도가 증가할 경우 두 가지 제수밸브 분포 모두에서 평균 단수인구수가 감소하는 것을 보였으며 감소되는 양은 제수밸브 신뢰도를 높이기 위한 인력과 비용의 투자 대비 피해의 저감을 보여 주는 것으로서 제수밸브 관리 프로그램의 비용대비 이득을 정량화한 것이다. 특히 제수밸브의 신뢰도가 낮은 범위에서 그 효과가 더 크게 나타났으므로 제수밸브의 전체적인 신뢰도가 낮다고 생각되는 상수관망에서 효율적인 제수밸브 관리 프로그램의 실행은 상수관 파괴에 따른 피해저감 측면에서 더 큰 효과를 나타낸다 할 수 있다.
- 3) 본 논문에서는 두가지의 제수밸브 분포만을 고려했으나 상수관망의 신뢰성 제고를 위해서 제수밸브를 추가로 설치할 경우 다양한 배치방법간의 우열을 제안된 방법을 사용하여 평가할 수 있으므로 가설계된 다양한 제수밸브 분포간의 비교를 통해서 효율적인 제수밸브 분포를 결정할 수 있을 것이다.

추후 연구과제로 상수관 각각의 파괴확률을 구할 수 있을 경우 상수관망 전체를 대상으로 더욱 정확한 상수관 파괴 및 제수밸브 오작동의 모의가 가능할 것으로 생각된다. 이를 위해서 관파괴확률을 구할 수 있는 기법과 이의 제안된 방법에 적용이 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 전환돈 (2005). "상수관망에서의 밸브에 의한 관의 부분적 격리와 상수관망의 효율성 평가." **한국수자원학회 논문집**, 제38권 제7호, 한국수자원학회, pp. 585-593.
- 전환돈 (2006). "상수관 파괴시 관망의 부분적 격리를 고려한 피해범위 산정." **한국수자원학회 논문집**, 제39권 제2호, 한국수자원학회, pp. 89-98.
- 전환돈, 김중훈 (2006). "상수관망의 부분적 격리를 위한 제수밸브 탐색 알고리즘." **상하수도학회지**, 20권 1호, 상하수도학회, pp. 35-43.
- Araujo, L.S., Ramos, H., and Coelho, S.T. (2006). "Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management", *Water Resources Management*, 20: 133-149.
- KIWA and AWWARF (2001). "Key criteria for valve operation and maintenance", AWWARF and KIWA
- Bao, Y. and Mays, L.W. (1990). Model for water distribution system reliability, *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(9), pp.1119-1137.
- 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.
- Goulter, I.D. and Coals, A.V. (1986). "Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks." *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 112(3), pp. 287-301.
- Hwandon Jun (2005). *Strategic valve locations in a water distribution system*, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic and State University.
- Mays, L. W. (1996). *Review of reliability analysis of water distribution systems*, Stochastic hydraulics '96, K. K. Tickle et al., eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 53-62.
- Sukru Serkan Ozger (2003). A semi-pressure-driven approach to reliability assessment of water distribution networks, Arizona State University.
- Su, Y.C., Mays, L.W., Duan, N. and Lansey, K.E. (1987), "Reliability-based optimization model for water distribution systems." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 114(12), pp. 1539-1567.
- Reis, L. F. R., Porto, R. M., and Chaudhry, F. H. (1997). "Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks By Genetic Algorithm" *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 6, Nov./Dec.
- Walski, T.M. (1993)a. "Practical aspects of providing reliability in water distribution systems." *Reliability Engineering and System Safety*, 42, pp. 13-19.
- Walski, T.M. (1993)b. "Water distribution valve topology for reliability analysis." *Reliability Engineering and System Safety* 42, pp. 21-27

(논문번호:07-45/접수:2007.05.07/심사완료:2007.06.22)