

## 상수관 파괴에 의한 피해 경감기법의 개발

## Development of a Method to Reduce Damages by Pipe Failures

전환돈\* · 박무종\*\* · 김종훈\*\*\* · 이환구\*\*\*\*

Jun, Hwan Don · Kim, Seok Hyeon · Park, Moo Jong · Kim, Joong Hoon · Lee, Hwan Goo

## Abstract

A water distribution system should be constructed reasonably to supply water for the customer with proper quality and pressure as demands at nodes fluctuate with time. Also it should be reliable to minimize undesirable effects on the customer when various accidents happen such as pipe failures. A new method is presented here to reduce damages by pipe failures. For the work, two methods, namely, the method for estimating practical extent of damage by pipe failures and for estimating water distribution reliability, are adopted to analyze a water distribution system and to explore the damage reduction by pipe failures. As the results from the analysis of the model, the damage can be reduced effectively by increasing durability of each pipe in minimum cutsets according to the order of priority. The suggested method was applied to the Cherry-Hill network to verify its applicability.

**Key words** : Water Distribution System, Pipe Failure, Damage Reduction, Minimum Cutsets

## 요 지

배수시설은 합리적인 계획으로 배치하여 시간적으로 변동하는 수요량에 대하여 적절한 수질의 물을 적절한 압력으로 연속적이면서 안정적으로 공급해야 한다. 또한 상수관 파괴 같은 사고가 발생했을 경우에도 용수 수요자에 대한 영향을 최소화 할 수 있는 안정성이 높은 시설을 목표로 구축되어야 한다. 본 연구에서는 상수관 파괴에 의한 피해를 합리적으로 경감시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구를 위해 기존의 상수관 파괴에 의한 피해영역 산정기법과 신뢰도 산정기법을 통해서 상수관망을 분석하고 상수관 파괴에 의한 피해 경감기법을 도출하였다. 분석결과 minimum cutset에 속하는 상수관의 내구성을 중요우 선순위에 따라 향상시킴으로써 상수관 파괴에 의한 피해를 효과적으로 경감시킬 수 있었으며 제안된 방법을 Cherry Hill 상수관망에 적용하여 적용성을 검증하였다.

**핵심용어** : 상수관망, 상수관 파괴, 피해경감, Minimum Cutsets

## 1. 서 론

상수관망(water distribution system)은 도시기능 유지를 위한 용수공급에 필요한 사회기반시설물 중의 하나로서 정수장에서 정수된 용수를 수송, 분배, 공급하는 기능을 가지며 상수관, 펌프 및 밸브 등이 조합된 매우 복잡한 네트워크 시스템이다. 통계청의 자료에 따르면 2004년 기준 전국의 총 수도관의 연장은 약 5,322 km이며 이 중 배수관은 3,344 km로서 전체 관로의 63%를 이를 정도로 전체 상수시스템의 많은 부분을 차지하는 시설물이다. 이러한 배수시설은 합리적인 계획으로 배치하여 시간적으로 변동하는 수요량에 대하여 적절한 수질의 물을 적절한 압력으로 연속적이면서 안정적으로 공급해야 하며 상수관 파괴 같은 사고가 발생했을 경우에도

용수 수요자에 대한 영향을 최소화 할 수 있는 안정성이 높은 시설을 목표로 구축되어야 한다. 우리나라는 1908년 서울에 최초 수도를 공급한 이후로 1954년 22%에 불과하던 급수보급률이 2004년 기준 91%에 이르고 있으나(KOSIS 국가통계포털) 도시화에 따른 인구 집중으로 인해 용수가 부족한 지역이 나타나고 있으며 관로의 노후화 및 상수관 등의 구성요소의 파손 등으로 인한 단수가 빈번하게 발생하고 있어 상수관망의 설계 및 유지관리를 위한 합리적이고 고도화된 기법의 개발이 필요하다.

상수관망의 신뢰도(reliability)는 상수관망의 상태를 표현하는 중요한 지표로서, 설계뿐만 아니라 적절한 유지관리 계획 수립에 있어서 중요한 역할을 하고 있다. Mays(1996)는 시스템의 신뢰도를 크게 기계적인 신뢰도와 수리학적인 신뢰도

\*정회원 · 한밭대학교 토목시스템공학부 전임강사(E-mail:hwanonjun@gmail.com)

\*\*정회원 · 한서대학교 토목공학과 부교수(교신저자)

\*\*\*정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수

\*\*\*\*현대건설(주) 기술개발원 설계실 수자원/환경팀 부장

로 구분하였다. 여기서 기계적인 신뢰도라는 것은 시스템내의 구성요소의 빈번한 수리나 구성요소의 교체 없이 지속적으로 장기간 용수공급을 지원할 수 있는 시스템의 능력이며 수리학적인 신뢰도는 용수 소비자들에게 적절한 수압으로 충분한 물을 공급할 수 있는 시스템의 능력을 의미한다. 시스템의 신뢰도는 기계적인 신뢰도와 수리학적인 신뢰도 어느 한쪽만 만족한다고 해서 확보되는 것은 아니다. 즉 시스템의 신뢰도를 산정하기 위해서는 기계적인 신뢰도와 수리학적인 신뢰도를 동시에 고려해야한다. 만약 상수관망이 합리적인 절차에 의해 설계되어 계획한대로 관망 내 용수 수요자에게 효율적이고 안정적으로 급수를 하고 있는 상태라면 해당 상수관망은 신뢰성이 확보된 상태라고 할 수 있다. 그러나 상수관망은 신뢰도를 100% 장담할 수 없는 상수관, 펌프 및 밸브 등의 구성요소로 조합된 매우 복잡한 네트워크 시스템이다. 또한 시설의 노후화, 구조적인 취약성, 급수인구 증가로 인한 급수량 증대 등과 같은 다양한 이유로 인해 비정상 상태가 될 위험성을 내포하고 있다. Su 등(1987), Mays(1996), 박재일(2006) 등 에 의하여 상수관망의 신뢰도를 추정하기 위한 많은 연구가 진행되었다. Su 등(1987)은 네트워크 내에서 파괴 시 수리학적인 비정상 상태를 유발할 수 있는 구성 요소의 최소한의 집합으로 정의되는 minimum cutset을 기반으로 시스템의 신뢰도를 산정하였다. Minimum cutset을 구하기 위해 다양한 상수관이나 2개 이상의 상수관 조합을 결정하고 해당 상수관에 대한 파괴 모의를 통해 시스템 내의 어느 하나의 node라도 기준이하의 압력 저하를 유발하는 조합을 minimum cutset으로 규정하였다. 그러나 이 모형은 피해영역을 파괴된 상수관에 한정함으로써 실제 피해 영역을 고려하지 못한 단점을 가지고 있다. 이에 박재일(2006)은 Jun (2005)이 제시한 상수관 파괴에 의한 실질적인 피해영역을 추정기법을 도입하였고 상수관망 신뢰도 계산의 정확성과 효율성을 높이기 위해 minimum cutset을 바탕으로 Mays (2004)의 success mode approach를 적용한 신뢰도 추정 모형을 개발하였다.

본 연구에서는 상수관 파괴에 의한 피해를 합리적으로 감소시킬 수 있는 방법을 제시하였다. Jun (2005)이 제시한 상수관 파괴에 의한 피해영역 산정기법과 박재일(2006)이 제시한 신뢰도 산정기법을 통해서 상수관망을 분석하여 minimum cutset에 속하는 상수관의 내구성을 중요우선순위에 따라 향상시킴으로써 수관 파괴에 의한 피해가 효율적으로 감소될 수 있다는 결론을 내릴 수 있었으며 제안된 방법을 Cherry Hill 상수관망에 적용하여 적용성을 검증하였다.

## 2. 상수관 파괴에 의한 피해 경감기법

### 2.1 상수관 파괴에 따른 피해영역의 추정

#### 2.1.1 Segment

Walski(1993)에 의하면 segment는 상수관이 파괴될 때, 파괴된 관과 함께 제수밸브에 의해서 차폐되는 주변 관의 집합으로 정의 할 수 있다. 즉, 한 파괴된 상수관을 격리시키기 위해 그 상수관에 인접한 관들도 함께 격리해야 할 경우 함

께 격리되는 여러 상수관과 절점을 하나의 segment로 정의 할 수 있다.

Su 등(1987)의 연구에서는 파괴된 상수관과 그로 인해 발생한 압력수두 부족지점을 피해영역으로 간주하였지만, 실제로는 상수관 차폐에 이용되는 제수밸브의 수와 위치에 따라 추가로 인근 관들이 차폐된다. 예를 들어 그림 1에서 P4가 파괴된다면 수리를 위해 제수밸브가 차폐되면서 인접한 P5역시 차폐된다. 결과적으로 차폐된 segment내에 있는 절점 N3에는 용수 공급이 단절되며 또한 이로 인해 압력수두가 부족한 지점이 발생할 수 있다. 이와 같은 피해영역 추정방법은 제수밸브의 위치와 수를 고려할 수 있으므로 좀 더 현실에 가깝게 피해영역을 추정할 수 있다.

#### 2.1.2 비의도적 구역고립 (Unintended Isolation)

상수관 파괴 시 복구를 위하여 파괴된 관을 포함한 segment를 차폐할 경우, 해당 segment가 수원으로부터 유일한 경로일 경우에 연결된 하단 부 관들은 수원으로부터 용수 공급이 중단될 수 있다. 즉, 특정 관들은 segment의 차폐로 인하여 해당 관들의 용수공급 노선에 단절이 발생할 수 있다. Jun (2005)은 이러한 영역을 비의도적 구역고립으로 정의하였으며 이를 탐색하는 기법으로서 Breadth First Search 알고리즘을 한 단계 발전시켜 node-node matrix를 기반으로 한 Updated Breadth First Search 알고리즘을 개발하였다.

비의도적 구역고립이 발생할 경우, 이 영역에 있는 용수 수요자는 파괴된 상수관의 복구까지 용수공급을 받지 못하므로 비록 제수밸브에 차폐되지는 않았지만, segment 내에 있는 용수 수요자와 마찬가지로 용수 공급을 받을 수 없다. 그림 1에서 P4와 P5로 이루어진 segment는 비의도적 구역고립을 발생시킨다.

### 2.2 상수관망 신뢰도 추정기법

Su 등(1987)은 cutset을 ‘상수관망에서 일부 절점의 용수공급 불가능 상태를 야기하는 구성요소의 집합’으로 정의하고 상수관망에서 2~3개의 상수관이 동시에 파괴될 수 있는 상황을 고려하였다. 수리학적 모의를 통해 해당 조합의 파괴모의

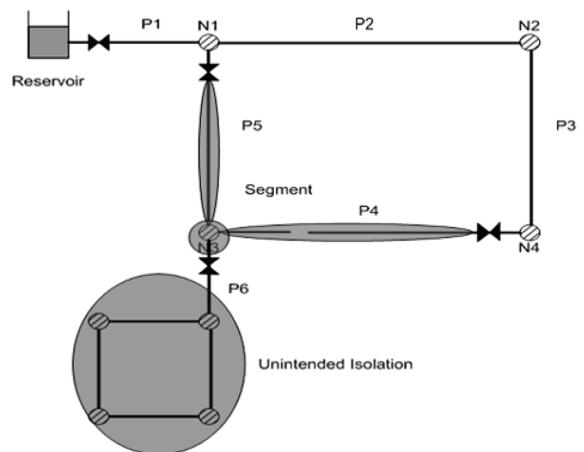


그림 1. P4 파괴에 따른 실제 피해영역 추정

결과 기준치 이하로 압력이 저하되는 절점의 유무로 minimum cutset을 추정하였다. 그러나 이는 파괴의 영역을 해당 상수관에 한정한 것으로 실제 발생할 수 있는 피해 영역을 고려하지 못하였으며 그 결과에 기인한 압력 저하 역시 신뢰할 수 없는 단점이 있다. 이에 박재일(2006)은 Jun (2005)이 제시한 상수관 파괴에 의한 실질적인 피해영역 추정기법을 도입하였고 상수관망 신뢰도 계산의 정확성과 효율성을 높이기 위해 minimum cutset을 바탕으로 Mays(2004)의 success mode approach를 적용한 신뢰도 추정 모형을 개발하였다. 본 모델은 segment를 cutset으로 하여 이 중 '상수관망의 기능 저하를 유발하는 최소한의 cutset'을 minimum cutset으로 정의하였다. 여기에서 기능의 저하는 상수관 파괴시 1개 이상의 절점에 용수 공급이 단절되거나 1개 이상의 절점에 기준 (1.5 kgf/cm<sup>2</sup>)이하의 압력저하를 유발하거나 비의도적 구역고립(unintended isolation)을 유발하는 것으로 한정되었다. 이러한 과정을 통하여 시스템 내의 segment 중 minimum cutset이 정의되면 success mode approach를 적용하여 시스템 신뢰도를 추정하게 된다. 아래는 시스템의 신뢰도를 추정하는 식을 나타낸다.

$$R = \prod_{k=1}^K P(S_{C_k}) \quad (1)$$

$$P(S_{C_k}) = \prod_{i=1}^K P(S_{P_i}) = P(S_{P_1} \cap S_{P_2} \cap S_{P_3} \cap \dots \cap S_{P_i}) \quad (2)$$

즉, 시스템의 신뢰도는 상수관망내에서 minimum cutset으로 정의되는 상수관 전체의 신뢰도의 곱으로 나타낼 수 있다. 다시 말해 minimum cutset내에 있는 상수관중 어느 하나라도 파괴되지 않는다면 어떠한 절점에도 용수 단절, 압력저하, 비의도적 구역고립이 발생하지 않는다.

### 2.3 상수관 파괴에 의한 피해의 크기 산정방법 및 피해 경감기법 제안

박재일(2006)의 신뢰도 추정 모형을 분석한 결과 시스템의 신뢰도 향상은 minimum cutset내 상수관의 내구성을 향상시킴으로써 가능해진다. 다시 말해, 식 (1), (2)에서 개개의  $S_{P_i}$ 가 커진다면 결국 시스템의 신뢰도는 증가하게 될 것이다. 여기에서 고려할 점은 제한된 공사비 내에서 어떤 관을 우선 보강해야 하는가이다. 즉, 경제적, 안정성의 관점에서 시스템의 신뢰도를 효율적으로 향상시키기 위해서는 minimum cutset에 포함되는 관 중 파괴확률이 높고 공사비 대비 신뢰도 향상 효과가 크며 파괴 시 큰 피해를 발생시키는 관을 우선 보강해야 한다. 그러나 박재일(2006)의 모델은 minimum cutset내 상수관 중 어느 하나라도 파괴되었을 때 피해의 규모에 상관없이 시스템이 off된 상태로 규정함으로써 피해의 범위와 크기 등은 고려하지 못한다는 단점이 있다. 즉, 박재일(2006)의 모델을 통해서만 관망 내 전체 상수관 중에서 어떤 상수관을 보강해야 할 것인가를 알 수 있으나 관 파괴시

상수관 파괴에 의한 피해 경감기법의 개발

피해의 크기를 고려한 보강 우선순위를 결정할 수는 없다. 본 연구에서는 박재일(2006) 모형의 단점을 보완하여 상수관 파괴에 따른 피해의 크기를 정량적으로 산정할 수 있는 방법을 제시하였으며 이를 바탕으로 피해를 효과적으로 경감시키기 위하여 보강의 우선순위를 결정하는 방법을 제시하였다.

보강의 우선순위를 결정하기 위해서는 우선 상수관 파괴에 따른 피해의 크기를 정량화할 필요가 있다. 임의의 상수관이 파괴되면 해당상수관이 속한 segment는 수리를 위해 폐합되어야 한다. 또한 구조에 따라 비의도적 구역고립이 발생할 수 있다. 결과적으로 상수관 파괴에 따른 단수인구는 segment 내 절점과 발생한 비의도적 구역고립 내 절점에서 용수를 공급받는 수요자가 된다. 다시 말해 피해의 크기를 고려하기 위해서는 segment 단위로 우선순위를 결정해야 한다.

전술한 바와 같이 segment 내 상수관이 하나라도 파괴되면 제 기능을 못하게 된다. 즉, 제 기능을 발휘하기 위해서는 segment내 모든 상수관이 정상 상태에 있어야 하므로 segment가 정상 상태일 확률은 다음과 같다.

$$S(\text{Seg}_i) = \prod_{j=1}^M S(P_j) \quad (3)$$

여기서  $S(\text{Seg}_i)$ 는 minimum cutset의 범위에 있는  $i$ 번째 segment가 정상상태(success)에 있을 확률을 의미한다.  $S(P_j)$ 는 해당 segment내에 있는 상수관이 정상상태일 확률이며  $M$ 은 segment 내 상수관의 수이다. 또한 이 값으로부터 segment가 비정상 상태일 확률을 추정할 수 있다.

$$F(\text{Seg}_i) = 1 - S(\text{Seg}_i) \quad (4)$$

여기서  $F(\text{Seg}_i)$ 는 minimum cutset의 범위에 있는  $i$ 번째 segment가 비정상상태(failure)에 있을 확률을 의미한다.

Segment가 파괴됨으로써 발생하는 단수인구수는 지역 내 실제 급수 인구 또는 계획급수인구 등으로부터 추정되어야 한다. 그러나 해당 자료가 없을 경우에는 다음과 같은 방법을 통해 개략적으로 추정될 수 있다.

$$NCOS = \sum_{k=1}^O D_k / AWQUH \quad (5)$$

여기서 NCOS는 단수인구(the Number of Customers Out of Service)를 의미하며 AWQUH는 일인당 평균 물 사용량(the Average Water Quantity Used per Capita)이다.  $D_k$ 는 폐합된 segment와 비의도적 구역고립 내에 있는  $k$ 번째 절점의 수요량을 의미하며  $O$ 는 절점의 수이다.

ENCOS는 segment가 비정상 상태일 때 발생한다. 즉 예상 단수인구수(the Expected Number of Customers Out of Service)는 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$ENCOS = F(\text{Seg}_i) \times NCOS \quad (6)$$

큰 ENCOS를 가지는 segment가 우선 보강되어야 한다. 또

한 해당 segment 내에서는  $S(P_j)$ 가 낮은 상수관의 보강이 우선시 된다.

### 3. 적용 및 결과

#### 3.1 적용 지역 및 조건

적용대상 지역은 미국 Connecticut 주에 위치한 Cherry Hill 상수관망을 선정하였다. Cherry Hill 상수관망은 90개의 노드, 104개의 파이프(6, 8, 12 인치 3종 관경으로 구성), 94개의 제수 밸브 등으로 구성되어 있다. (그림 2(a)) 본 연구에서 AWQUH를 171 gallon/ day/person (<http://water.me.vccs.edu/math/waterdemand2.html>)을 EPANET 입력 단위와 동일한 GPM으로 변환하여 적용하였다. 파괴 시 가장 많은 단수 인구를 발생시키는 segment는 그림 2(b)와 같다. 해당 segment는 7개의 상수관으로 이루어져 있으며 이 중 단 하나의관이 파괴된다할지라도 8개의 제수밸브로 폐합되며 1,182명의 단수인구가 발생한다.

상수관의 신뢰도는 Su 등(1987)의 식을 이용하여 추정하였으며 펌프 및 탱크와 같은 요소는 파괴가 발생할 경우 시스템 전체가 마비되어 본 연구의 범위를 벗어나게 되므로 신뢰도 추정에서 제외하였다. 개개의 상수관의 신뢰도는 Su 등(1987)에 의해 제시된 St. Louis 시에서 장기간의 상수관 파괴기록으로부터 추정된 회귀식을 바탕으로 추정하였다. (식 (7)~(10))

$$\alpha_i = \frac{0.6858}{D_i^{3.26}} + \frac{2.7158}{D_i^{1.3131}} + \frac{2.7685}{D_i^{3.5792}} + 0.042 \quad (7)$$

$$\beta_i = \alpha_i \times L_i \quad (8)$$

$$f_i = 1 - e^{-\beta_i} \quad (9)$$

$$r_i = 1 - f_i \quad (10)$$

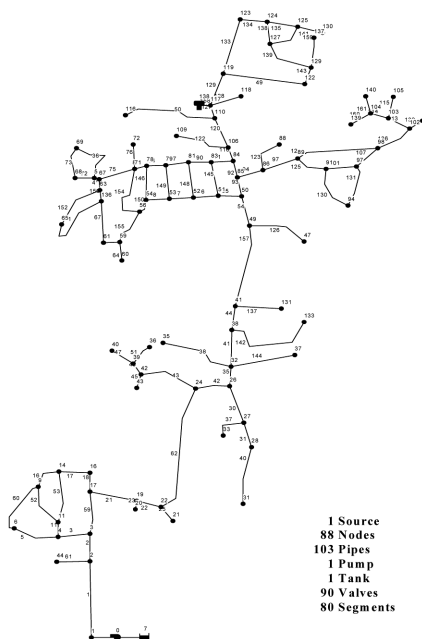
여기서,  $i$  = Pipe index,  $D$  = Pipe diameter(in),  $L$  = Pipe length(mile),  $\alpha$  = Breaks/mile/year,  $\beta$  = Breaks/year,  $f$  = Failure probability,  $r$  = Reliability.

이때 구해진 신뢰도는 1년 동안 시스템에 어떠한 질점에도 용수 단절, 압력저하, 비의도적 구역고립이 발생하지 않을 확률을 의미한다.

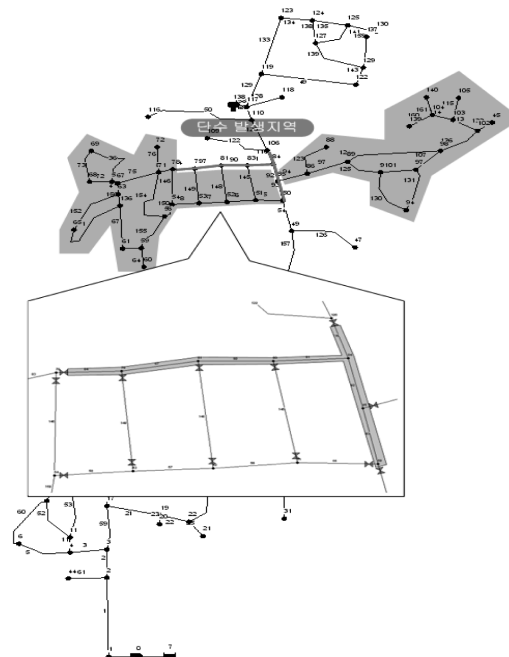
#### 3.2 적용결과

박재일(2006)의 모형을 적용한 결과 Cherry Hill 총 103개의 상수관 중에서 90개의 상수관이 minimum cutset에 속하였다. 이 중 큰 단수인구(NCOS)를 가지는 segment에 속하는 상수관들이 보강의 우선대상이 되며 해당 segment 내에서는  $S(P_j)$ 가 낮은 상수관을 우선 보강대상이 된다. 아래의 표 1은 상기 원칙에 따라 minimum cutset에 속하는 90개의 상수관 중 NCOS가 150명 이상인 segment까지만 보강 우선순위를 나타낸 것이다. 또한 보강 전 ENCOS의 총합은 285.52명으로 나타났으며 상수관망의 신뢰도는 0.137310로 계산되었다.

본 적용에서는 파괴 시 가장 큰 단수인구가 발생하는 S(20)에 속한 7개의 상수관을 14inch의 관으로 교체하여 각각의 신뢰도가 0.99이상일 수 있게 하였다. 아래의 표 2는 보강 결과를 나타낸다. 보강 결과 전체 시스템의 신뢰도는 0.137310에서 0.141551로 증가 수준이 미미 하였지만 총 ENCOS는 285.52명에서 252.17명으로 11.68% 감소하였다.



(a) Cherry Hill 상수관망의 구성



(b) Cherry Hill 상수관망 취약지역

그림 2. Cherry Hill 상수관망

표 1. Cherry Hill 상수관 보강 우선순위 결정.

우선 순위	Pipe ID	D (inch)	L (ft)	Reliability	Failure Rate	Segment ID	NCOS	Segment Reliability	ENCOS
1	84	8	375	0.984393	0.015607	S(20)	1182	0.914226	101.36
1	87	8	375	0.984393	0.015607				
1	90	8	375	0.984393	0.015607				
1	91	8	375	0.984393	0.015607				
5	93	12	400	0.988958	0.011042				
6	92	12	300	0.991707	0.008293				
7	116	12	264	0.992699	0.007301				
8	120	12	647	0.982201	0.017799	S(39)	456	0.975679	11.08
9	127	12	240	0.993360	0.006640	S(13)	453	0.969227	13.95
10	41	12	743	0.979587	0.020413				
11	35	12	383	0.989425	0.010575				
12	67	8	838	0.965460	0.034540	S(24)	383	0.923611	29.23
13	75	12	647	0.982201	0.017799				
14	156	8	216	0.990981	0.009019				
15	72	12	300	0.991707	0.008293				
16	71	12	240	0.993360	0.006640				
17	4	12	83	0.997699	0.002301				
18	97	12	623	0.982855	0.017145				
19	94	12	240	0.993360	0.006640	S(43)	221	0.935323	14.30
20	133	8	1150	0.952907	0.047093				
21	129	12	671	0.981546	0.018454	S(18)	205	0.923296	15.72
22	157	12	1796	0.951368	0.048632				
23	54	12	600	0.983483	0.016517				
24	44	12	479	0.986792	0.013208	S(71)	180	0.926461	13.25
25	142	8	1821	0.926461	0.073539				
26	136	8	647	0.973226	0.026774	S(34)	158	0.951949	7.59
27	107	8	527	0.978137	0.021863				
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
System Reliability				0.137310	Total ENCOS				285.52

표 2. Cherry Hill 상위 7개 상수관 보강 결과.

우선 순위	Pipe ID	D (inch)	L (ft)	Reliability	Failure Rate	Segment ID	NCOS	Segment Reliability	ENCOS
1	84	14	375	0.991022	0.008978	S(20)	1182	0.942463	68.01
1	87	14	375	0.991022	0.008978				
1	90	14	375	0.991022	0.008978				
1	91	14	375	0.991022	0.008978				
5	93	14	400	0.990426	0.009574				
6	92	14	300	0.992811	0.007189				
7	116	14	264	0.993671	0.006329				
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
System Reliability				0.141551	Total ENCOS				252.17

4. 결 론

상수관망(water distribution system) 합리적인 계획으로 배

치하여 시간적으로 변동하는 수요량에 대하여 적절한 수질의 물을 적절한 압력으로 연속적이면서 안정적으로 공급해야 한다. 또한 상수관과피 같은 사고가 발생했을 경우에도 용수

## 참고문헌

수요자에 대한 영향을 최소화 할 수 있는 안정성이 높은 시설을 목표로 구축되어야 한다. 본 연구에서는 상수관 파괴에 의한 피해를 효과적으로 경감시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 연구에 따른 결론을 다음과 같이 정리하였다.

- (1) Jun (2005)이 제시한 상수관 파괴에 의한 피해영역 산정 기법을 기반으로 피해의 크기를 정량적으로 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.
- (2) 박재일 (2006)의 신뢰도 산정모형을 보완하여 상수관 파괴에 의한 피해를 효과적으로 경감시키기 위하여 보강의 우선순위를 결정하는 방법을 제시하였으며 그 방법을 Cherry Hill 상수관망에 적용하여 적용성을 검증하였다. 적용결과 시스템 전체의 신뢰도 향상은 미미하였으나 상수관 파괴에 의한 피해는 효과적으로 경감시킬 수 있었다.
- (3) 차후 과제로서 상수관의 내구성 증가뿐만 아니라 제수 밸브 설치를 통한 구조적 개선을 통한 피해 경감기법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

- 박재일 (2006) 상수관망의 신뢰도 추정을 위한 Segment기반 Minimum cutset method, 석사학위논문, 고려대학교.
- 환경부 (2004) 상수도 시설기준. 환경부.
- Jun, H.D. (2005) *Strategic valve locations in a water distribution system*, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, Virginia.
- 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.
- Mays, L.W. (2004) *Water supply systems security*. The McGraw-Hill companies, New York.
- Su, Y.C., Mays, L.W., Member ASCE, Duan, N. and Lansey, K.E. (1987) Reliability based optimization model for water distribution systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 12, pp. 1539-1556.
- Walski, T.M. (1993) Water distribution valve topology for reliability analysis. *Reliability engineering & system safety*, Vol. 42, No. 1, pp. 21-27.

◎ 논문접수일 : 08년 11월 06일  
◎ 심사의뢰일 : 08년 11월 06일  
◎ 심사완료일 : 08년 11월 21일