

A study on optimal planning of risk reduction for water suspension in water pipe system using fault tree analysis

결함트리분석을 이용한 상수관망 단수 리스크 저감 최적 방안 연구

Tae Ho Choi¹ · A Ri Kim² · Min Cheol Kim² · Ja Yong Koo^{2*}

최태호¹ · 김아리² · 김민철² · 구자용^{2*}

¹K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation · ²Dept. of Environmental Engineering, University of Seoul

¹한국수자원공사 K-water연구원 · ²서울시립대학교 환경공학과

Abstract : This study was carried out to analyze water suspension in the water supply system through fault tree analysis. And quantitative factors was evaluated to minimize water suspension. Consequently the aim of this study is to build optimal planning by analyzing scenarios for water suspension.

Accordingly the fault tree model makes it possible to estimate risks for water suspension, current risks is 92.23 m³/day. The result of scenario analysis by pipe replacement, risks for water suspension was reduced 7.02 m³/day when replacing WD4 pipe. As a result of scenario analysis by water district connections, the amount of risk reduction is maximized when it is connecting to network pipe of D Zone. Therefore, connecting to network pipe for D Zone would be optimal to reduce risk for water suspension.

Key words : Fault tree analysis, Cohort model, Risk of water suspension, Pipe failure probability

주제어 : 결함트리분석, 코호트 모델, 단수 리스크, 관 파손확률

1. 서론

안정된 수량 및 안전한 수질의 수돗물 공급은 공중보건 및 경제개발을 위한 기본적인 요구조건이 될 수 있다. 수돗물 공급을 위한 상수관망은 다양한 환경변화에 직면하고 노출되면서 많은 리스크와 불확실성을 수반하게 된다. 또한 상수도시설은 인구증가와 도시화로 인해 양적으로 광범위해졌으며, 예측불가능한 사고가 발생하거나 피해를 야기할 수 있는 가능성이 높아져 가고 있다. 예를 들어, 상수관망에서의 물공급은 관로의 파손이나 펌프의 고장 등 어떠한 요인들에 의해 중단될 수 있다. 특히, 상수관망에서의 어느 한 구성요소의

사고는 그 구성요소 이후의 하위시스템 전체에 영향을 미치게 된다. 따라서 상수관망을 효율적으로 운영하기 위해서는 상수관망에서의 물공급 시스템 전체에 대한 분석과 이해가 필요하며, 개별적인 관점이 아닌 종합적인 관점에서 리스크 평가를 수행할 필요가 있다.

상수도시설물뿐만 아니라 이를 이용하는 수요자 역시 넓은 범위의 리스크에 노출되어 있으며, 관로사고의 발생 등으로 인해 단수와 같은 피해를 받게 된다. 그러므로 리스크 분석을 통한 사전 방지와 대책으로 상수관망에서의 리스크를 줄이는 것은 경제적인 손실 방지와 수요자들의 상수도 서비스 불신을 동시에 줄일 수 있다.

상수관망에서의 리스크 평가는 리스크와 관련된 넓은 문제들을 분석할 수 있는 몇 가지 방법과

• Received 02 December 2014, revised 10 December 2014, accepted 12 December 2014.

* Corresponding author: Tel : +82-2-6490-2866 Fax : +82-2-6490-5465 E-mail : jykoo@uos.ac.kr

도구의 접근이 필요하다. 결함트리분석은 시스템 실패의 잠재적인 원인을 확인하는 구조화된 분석 과정이며, 이를 통해 상수관망의 물공급 시스템 전체에 대한 단수 리스크 분석이 가능할 것으로 판단된다. 또한 관로사고들 사이의 상호관계를 모델링할 수 있고, 관로 파손의 영향이 결함트리분석 방법에 포함되어 있기 때문에 단수 리스크 수준을 정량화할 수 있는 리스크 평가 도구로써 이용할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 결함트리분석을 기반으로 한 상수관망에서의 단수 리스크 분석을 하고자 하며, 이를 통해 상수관망에서의 단수 리스크를 최소화하기 위한 정량적 지표를 개발하고, 단수 리스크 저감에 대한 시나리오 분석을 통해 단수 리스크를 최소화할 수 있는 상수관망의 최적 유지관리 방안을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 상수관망에서의 리스크 평가 방법

상수관망에서의 리스크 평가와 관련된 많은 연구들이 있었으며 특히, Ostfeld(2004)는 접속 불가능성 및 위상적인 리스크와 수리학적인 리스크로 분류한 바 있다.

접속 불가능성 및 위상적인 리스크는 정해진 상수관망에서 구성요소 간의 물리적으로 연속되지 않을 확률을 측정하는 것과 관련되어 있으며, 수리학적인 리스크는 적합한 절점 수량과 압력으로 수요자에게 물을 공급하지 못할 확률로 정의된다.

먼저, 접속 불가능성 및 위상적인 리스크의 경우에는 관 파손 등에 의해서 절점과 절점이 연결되지 않아 단수되거나 제수밸브 차단 등에 의해서 수요부족량이 발생하는 것을 산정하기 위하여 관 파손확률 모델과 절단집합방법 등을 많이 활용하고 있으며, 특히 Wagner et al.(1988)은 연결성과 접속가능성을 평가하기 위한 분석적인 방법론을 제안한 바 있고, Goulter et al.(1990)은 접속 불가능성 및 위상적인 리스크 개념을 이

용하여 시스템 리스크를 시스템 내에 어떤 사고가 발생할 확률로써 정의한 바 있다. 그리고 Isoyama et al.(2000)은 접속 불가능성 및 위상적인 리스크 개념을 통해 관 특성과 관로 파손율의 관계를 제시하였으며, Wang et al.(2009)은 물공급 시스템 내의 다양한 수용가의 특성에 따른 리스크의 공간분포를 산정하여 제시하였다.

한편, 수리학적인 리스크는 관 파손에 의해 절점의 수압조건이 만족하지 않아 수요를 충족할 수 없는 수리학적 원인에 따른 수요 부족량을 산정하기 위한 관망해석으로 구분되어 있다. 과거 연구에서 수리학적 모의실험은 사고 상황을 가정하여 구성요소들을 제거함으로써 시스템의 능력 감소 및 위상적인 변화로부터의 수리학적 변동성을 평가하기 위해서 사용되었다. 이 결과는 최소절단집합(minimum cut set) 여부를 판단하는 기준이 되거나 시스템 리스크를 직접적으로 평가하기 위해 사용되었다. 특히, Cullinane et al.(1986), Bao et al.(1990), Shinstine et al.(2002), Choi et al.(2013)이 수리학적인 리스크를 통해 상수관망에서의 리스크 평가를 수행한 바 있다.

이에 본 연구에서는 상수관망에서의 리스크 중 결함트리분석을 이용하여 접속 불가능성 및 위상학적 리스크의 관점에서 단수 리스크를 산정하고자 한다.

2.2 결함트리분석

2.2.1 결함트리분석의 개요

결함트리분석(Fault Tree Analysis; FTA)은 정상사건(top event)의 원인관계를 논리적으로 추구하고 하위사건(lower event)과 그 발생에 이르기까지의 경로를 명확하게 하려는 연역적, 귀납적 해석기법으로 사건 사이의 상호작용을 기반으로 구조화되어 있고, 전형적으로 시스템 실패의 확률을 계산하는데 사용된다. 시스템 실패는 결함트리에서 정상사건으로 표현되고, 논리 게이트를 사용함으로써 정상사건과 다른 사

건 간의 발생이 어떻게 야기되는지를 형성하게 된다. 정상사건은 세부 사항의 적당한 수준이 얻어질 때까지 하위사건으로 나누어지게 된다. 결합트리에서 하위 수준의 사건들을 기본사건이라고 하고 기본사건들은 시스템 실패를 일으킨다. 논리 게이트는 사건들 간의 상호작용을 나타내며, 부울(Boolean) 이론에 근거한다.

결합트리의 분석절차는 분석목적이나 분석수준에 따라 다르지만 통상 1) 분석범위의 정의 및 분석수준의 결정, 2) 대상 시스템의 특성 파악, 3) 정상사상의 설정, 4) 결합트리의 구성, 5) 결합트리의 정성적 분석, 6) 결합트리의 정량적 분석, 7) 분석결과의 평가 및 보고 와 같이 7단계로 이루어진다.

그리고 결합트리의 구조도 작성은 “1) 분석하려고 하는 시스템 전체의 결합이나 바람직하지 않은 사건을 정상사건으로 상정한다. 2) 정상사건의 하단에 이와 직접적으로 관련된 하위 제1수준의 사건을 나열한다. 3) 정상사건과 하위 제1수준의 사건 간의 인과관계를 고려하여 논리 게이트로 연결한다. 4) 하위 제1수준의 사건을 중간사건으로 하여 이와 관련된 하위 제2수준의 사건을 나열한다. 5) 하위 제1수준의 사건과 관련된 하위 제2수준의 사건 간의 인과관계를 고려하여 논리 게이트로 연결한다. 6) 각 하위 수준의 사건을 더 이상 분해할 수 없을 때까지 위의 과정을 반복한다.” 의 순으로 작성할 수 있다. 이때, 특정 게이트에 대한 모든 입력사항은 그 입

력사항들 중 어느 하나의 분석이라도 시도되기 전에 완전히 정의되어야 하며, 게이트는 사상들 간의 결합논리를 설명하기 위한 것이므로 직접 다른 게이트와 연결되어서는 안 된다. 그리고 이러한 결합트리의 구조 및 구조도 작성방법을 도식화 하면 다음 <Fig. 1>과 같다.

2.2.2 논리 게이트 및 방정식

결합트리를 구축하기 위해 OR 게이트, AND 게이트, 첫 번째 전이 AND 게이트, 두번째 전이 AND 게이트와 같이 네 종류의 논리 게이트를 사용하며, 평균 실패율 λ 와 평균 불가동시간 $1/\mu$ 이 함께 사용된다. 실패까지의 평균 시간은 $1/\lambda$ 이므로 실패의 확률은 $P_f = \lambda/(\lambda + \mu)$ 로 쓸 수 있다. 논리 게이트는 각 기본 사건을 대체함으로써 출력 사건에 대한 평균 실패율과 평균 불가동시간을 계산하는 공식으로 개발되었다. 실패율과 불가동시간을 사용한 주요 이유 중 하나는 단지 실패의 확률뿐만 아니고 전문가 판단의 유발을 용이하게 하기 위함이다. 확률을 추정할 때 실패율과 불가동시간을 모두 고려할 필요가 있으므로, 이러한 투명성을 유지하기 위해 별도로 추정된다.

2.2.3 람다-타우 방법에 의한 결합트리분석

만약 시스템이 수리가능 체계라면, 하위수준의 기본사상이나 중간사상들의 평균 고장률 λ

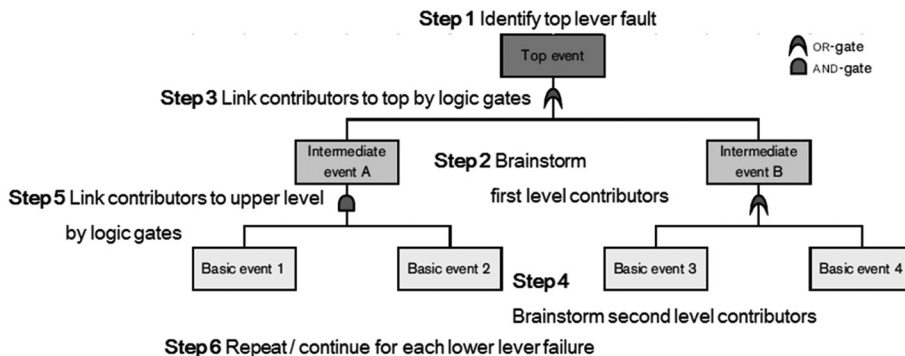


Fig. 1. Structuralization of fault tree.

와 평균 수리시간 τ 로부터 정상사상으로 인한 시스템의 평균 고장률이나 평균 수리시간도 쉽게 구할 수 있는데, 이러한 방법을 람다-타우 (λ - τ) 방법이라 부른다.

이 방법은 기본적인 몇 가지 가정을 하고 있는데, 그 주요 가정들을 살펴보면 다음과 같다.

- ① 수리시간 τ 와 가동시간 T 를 비교할 때 τ/T 가 매우 작다.
- ② 기본사상의 고장률은 매우 작다.
- ③ 고장률 λ 와 수리시간 τ 를 곱한 값이 $\lambda\tau \ll 1$ 로서 매우 작다.
- ④ 고장률 λ 와 가동시간 T 를 곱한 값이 $\lambda T \ll 0.1$ 로서 매우 작다.
- ⑤ 고장률 λ 와 수리율 $\mu(=1/\tau)$ 는 일정하다.
- ⑥ 고장사상들의 발생은 독립적이다.

이러한 가정들에 근거하여 몇 가지 근사값들을 이용하여 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

〈AND 게이트의 경우〉

$$\lambda_{AND} = \prod_{j=1}^n \lambda_j \left[\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n \tau_j \right] \quad (\text{식 1})$$

$$\tau_{AND} = \frac{\prod_{i=1}^n \tau_i}{\sum_{j=1}^n \prod_{i=1, i \neq j}^n \tau_i} \quad (\text{식 2})$$

〈OR 게이트의 경우〉

$$\lambda_{OR} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{식 3})$$

$$\tau_{OR} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \tau_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (\text{식 4})$$

본 연구에서의 상수관망의 단수 리스크 산정 시 결함트리분석 중 람다-타우 방법을 사용하였다.

3. 연구방법

본 연구에서는 결함트리분석을 이용한 단수 리스크 저감의 최적 방안을 도출하기 위해 다음 〈Fig. 2〉와 같이 3단계로 나누어 진행하였다.

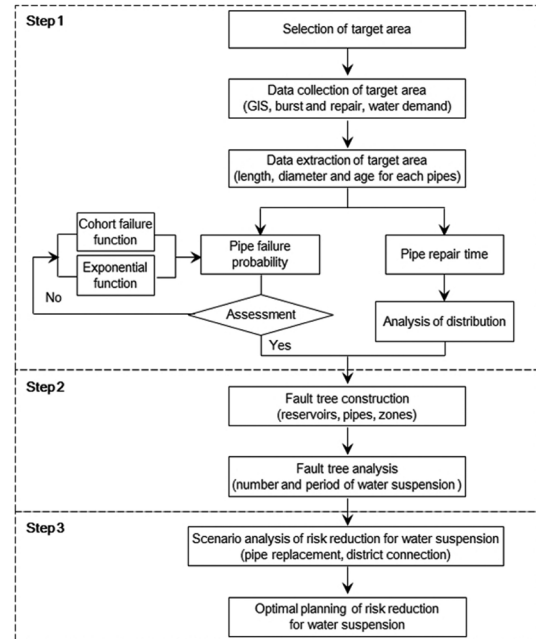


Fig.2. Flow chart of this study.

먼저, 1단계에서는 우선 대상지역을 선정한다. 후 대상지역에 대한 데이터를 수집하였다. 이를 위해 대상지역의 상수도 GIS, 누수복구대장, 수량 자료를 이용하였고, 수집된 자료를 토대로 대상지역에 해당하는 관로의 관경, 관연령, 관종, 관연장 등의 자료를 추출하였다. 이를 통해 관 파손확률은 코호트 생존 및 지수 함수를 이용하여 산정하였으며, 이 중 예측력이 높은 모델을 선정하였다. 그리고 관 파손복구시간은 관경에 따라 산정되도록 하였다.

2단계에서는 연구대상지역의 물공급 경로를 결함트리를 이용하여 구조화하고, 결함트리분석 중 람다-타우 방법을 이용하여 연구대상지역의 Zone별 단수 확률 및 단수 지속시간을 산정하였다. 이후 단수 리스크를 정량화하기 위해 단수

확률 및 단수 지속시간과 단수량의 곱으로 대상 지역의 단수 리스크를 산정하였다.

마지막으로 3단계에서는 관로 교체와 배수권역 연계로 구분하여 단수 리스크 저감 시나리오를 작성하였으며, 이를 통해 연구대상지역의 단수 리스크 저감 최적 방안을 도출하였다.

3.1 연구대상관로 선정

본 연구대상지역은 다음 <Fig. 3>과 같이 S시의 W배수권역이며, 주로 SN정수장에서부터 W배수지를 거쳐 물을 공급받고, 일부는 Y배수지를 통해 물을 공급받고 있다.

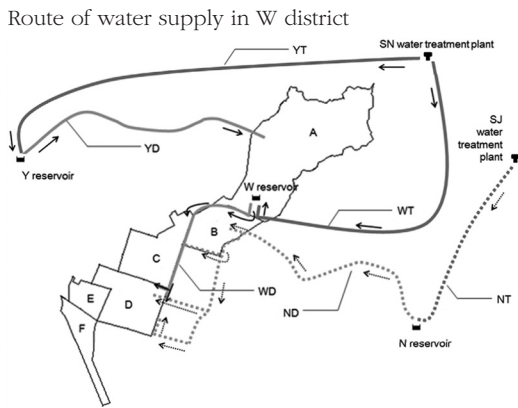


Fig. 3. Map of study area.

S시는 10개의 배수지가 있으며, 11개의 배수권역으로 나누어져 있다. GIS관망도 상의 관로는 32,851개, 급수전수는 63,364개, 펌프 72개, 배급수관연장 1,121 km로 구성되어 있고, 이 지역의 전체 수요량은 약 345,967 m³/day이다. S시의 W배수권역은 각각의 배수지를 포함하는 Y배수권역, I배수권역 및 N배수권역에 인접해 있다. W배수권역은 21개의 소블록으로 나누어져 있으며, 본 연구에서는 구조적으로 동일하거나 네트워크로 연결된 지역을 하나로 묶어 6개(A, B, C, D, E, F)의 Zone으로 구성하였다.

W배수권역의 W배수지는 A Zone을 제외한 나머지 Zone에 물을 공급하고 있으며, 6시간의

체류시간을 가지고 있다. A Zone은 SN정수장에서부터 Y배수지로 공급된 Y배수지의 물을 공급받고 있다. A ~ F Zone에 대한 수요량은 각각 269.61 m³/day, 8,919.86 m³/day, 9,049.01 m³/day, 11,398.80 m³/day, 3,861.95 m³/day, 4,593.49 m³/day이다.

3.2 연구대상지역의 결합트리 구조분석

연구대상지역인 W배수권역 계산의 용의성을 위해 물공급시스템 구조를 단순화시켰다. 이에 따라 SN정수장에서부터 W배수지까지의 송수관은 WT, W배수지로부터 W배수Zone들로 연결되는 배수관은 WD라고 하며, SN정수장에서부터 Y배수지까지의 송수관은 YT, Y배수지로부터 W배수Zone들로 연결되는 배수관은 YD라고 한다. 따라서 W배수권역은 크게 4가지 경로의 관(WT, WD, YT, YD)으로부터 물을 공급받고 있다. 또한, 매설된 관을 분류하여 수리학적으로 연결되어 있는 관의 관경과 매설년도가 같으면 하나의 관으로 가정하고, 동일한 계산이 가능한 관은 하나로 묶어서 계산하였다.

즉, SN정수장에서부터 W배수지까지 공급되는 송수관(WT)은 1개의 관으로 표현하고, W배수지로부터 W배수Zone들까지 공급되는 배수관(WD)은 6개(WD1, WD2, WD3, WD4, WD5, WD6)의 관으로 표현하였다. 그리고, SN정수장에서부터 Y배수지까지 공급되는 송수관(YT) 또한 1개의 관으로 표현하고, Y배수지로부터 W배수Zone들까지 공급되는 배수관(YD)은 4개(YD1, YD2, YD3, YD4)의 관으로 표현하였다.

다음은 다음 <Fig. 4>은 연구대상지역의 각각의 Zone들에 대한 물공급 경로와 결합트리 구조를 나타낸 것이다.

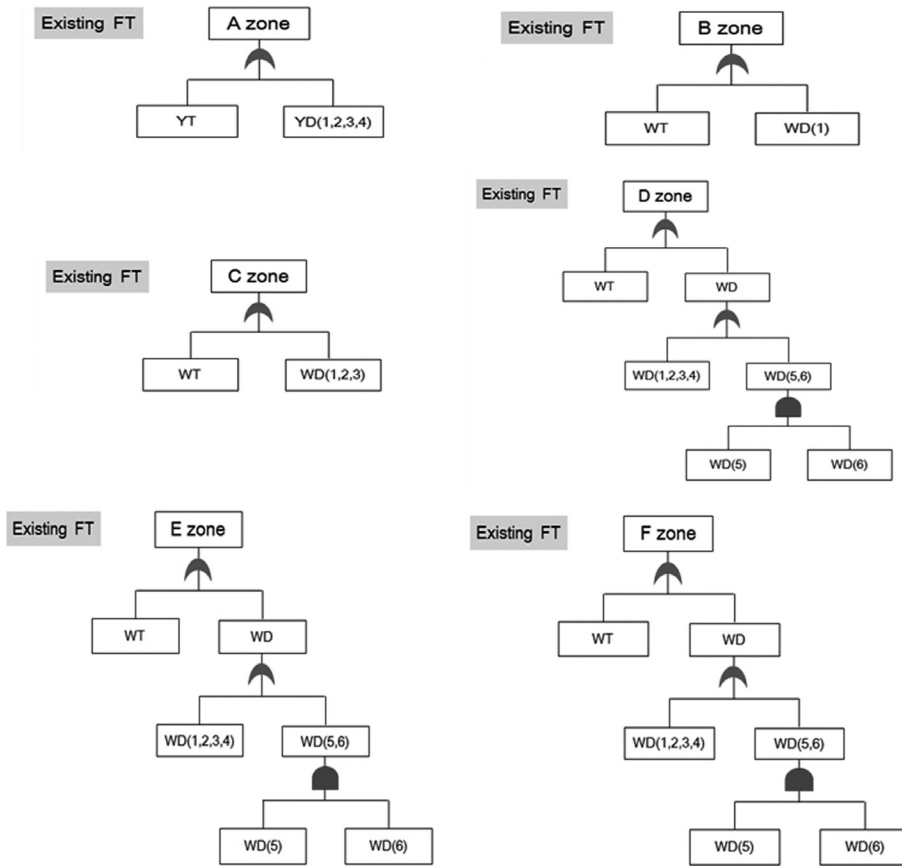


Fig. 4. Structure of FT in study area.

3.3 단수 리스크 산정 방법

현재 단수 리스크를 산정하기 위해서는 다음 인자에 대한 계산이 선행되어야 한다.

3.3.1 관 파손확률

관 파손확률 λ_{PP} (건/hr)은 단위길이당 관 파손확률(건/km/yr)에 관연장(km)을 곱한 후 단위환산을 하여 산정하고, 램다-타우 방법에서의 고장률 λ (건/hr)로 간주하여 AND와 OR 게이트를 계산하였다.

3.3.2 관 파손복구시간

관 파손복구시간 τ_{TP} (hr/건)은 관경에 따른 관 파손복구시간으로서 램다-타우 방법에서의 수리시간 τ (hr/건)으로 간주하여 AND와 OR 게이트

트를 계산하였다.

송수관의 경우, 배수지 체류시간이 라면 관 파손복구시간 τ_{TP} 은 다음 (식 5)와 같이 나타낼 수 있다. 이는 수리시간이 배수지 체류시간 보다 짧으면 관 파손에 의한 물공급 중단이 발생하지 않기 때문에 관 파손복구시간은 0이 되고, 수리시간이 배수지 체류시간보다 길 경우 그 차이 ($\tau-h$)만큼 관 파손복구시간이 발생하게 된다.

$$\tau_{TP} = \begin{cases} \tau-h & \text{for } \tau \geq h \\ 0 & \text{for } \tau < h \end{cases} \quad (\text{식 5})$$

3.3.3 단수 확률

단수 확률 λ_{PW} (건/hr)은 관 파손확률과 관 파손복구시간을 계산하여 최종적으로 표현되는 Zone에서의 단수 확률이다. 여기서, 단수 확률

은 단위시간 동안 몇 건의 단수발생이 일어날 있는 것인가를 의미한다. 즉, 단수 확률이 0.0002 라면 1시간 동안 0.0002건의 단수가 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

3.3.4 단수 지속시간

단수 지속시간 τ_{TW} (hr/건)은 관 파손확률과 관 파손복구시간을 계산하여 최종적으로 표현되는 Zone에서의 관 파손복구시간이다. 여기서, 단수 지속시간은 단수가 1건 발생했을 때 몇시간 동안 단수가 지속되는 지를 의미한다. 따라서 단수 지속시간이 10.45시간 이라면 단수가 발생했을 때 단수 1건당 10.45시간 동안 단수가 지속된다는 것을 의미한다.

3.3.5 단수 리스크

단수 리스크는 단수 확률, 단수 지속시간 그리고 해당되는 Zone의 수요량의 곱으로 산정하며 (식 6)과 같다. 여기서, 산정한 단수 리스크가 0.05 m³/day인 경우 하루동안 확률적으로 0.05 m³의 단수량이 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

$$R = \lambda_{PW} \times \mu_{TW} \times WD \quad (\text{식 } 6)$$

여기서, R = 단수 리스크(m³/day), λ_{PW} = 단수 확률(건/hr), μ_{TW} = 단수 지속시간(hr/건), WD = 물 수요량(m³/day)

3.4 단수 리스크 저감을 위한 시나리오 분석

단수 리스크 저감을 위한 방법으로는 관로 교체, 관 갱생, 관 복선화, 제수밸브 추가, 배수지 용량 변경, 배수권역 연계, 배수지 네트워크화 등이 있을 수 있다. 본 연구에서는 이 중 연구결과 도출의 효율성을 위해 관로 교체와 배수권역 연계의 2가지 시나리오를 통해 단수 리스크 저감을 분석하고자 한다. 즉, 시나리오 1은 개별 관의 개수에 따라 하위 시나리오로 나누고, 시나리

오 2는 연결관의 위치 및 개수에 따라 하위 시나리오로 나눈다.

단수 리스크를 줄이는 우선순위를 정하기 위해 단수 리스크 저감량을 다음 (식 7)과 같이 현재 단수 리스크에서 리스크 저감 조치 후의 단수 리스크를 뺀 값으로 산정하였다.

$$R_R = \sum_{i=1}^n R_C - \sum_{i=1}^n R_M \quad (\text{식 } 7)$$

여기서, R_R = 단수 리스크 저감량(m³/day), R_C = 현재 단수 리스크(m³/day), R_M = 리스크 저감 조치 후 단수 리스크(m³/day), = 영향을 받는 Zone의 수

4. 연구결과 및 고찰

4.1 결함트리분석을 이용한 상수관망에서의 단수 리스크 산정 결과

4.1.1 관 파손확률 산정 결과

관 파손확률 산정을 위해 송수관과 배수관을 구분하여 코호트 생존 함수와 지수 함수를 사용하였으며, 그 결과는 다음 <Table 1>과 같다.

송수관의 경우 코호트 생존 함수와 지수 함수 모두 높은 상관성을 보여 통계적으로 의미 있는 결과를 도출하였다. 두 모델 사이의 상관계수 차이가 0.01, 평균제곱오차의 차이가 0.001 밖에 나지 않아 오차범위 내에 있기 때문에 둘 중 어느 모델식을 써도 상관없다고 판단된다. 그러나 지수 함수는 시간 경과에 따라 파손확률이 무한히 증가하기 때문에 천문학적으로 증가할 수 있다.

Table 1. Summary of pipe failure probability models in water transmission pipes

Category	Cohort	Exponential
Equation	$y = \frac{0.2361e^{0.2361t}}{2372.8 + e^{0.2361t}}$	$y = 6.2 \times 10^{-4} e^{0.1589t}$
R	0.9198	0.9091
S.E.	0.0385	0.0373
M.S.E.	0.0002	0.0003

*R : Correlation coefficient, S.E. : Standard Error, M.S.E. : Mean Square Error

반면 코호트 생존 함수는 일정 시간이 경과하게 되면 파손확률의 증가를 제어하여 일정한 파손 확률로 수렴하기 때문에 관의 파손확률을 예측 하는데 지수 함수보다 적합하다고 판단된다. 따라서 관 파손확률을 산정하기 위해 송수관의 경우 코호트 생존 함수를 적용하였다.

하지만, 배수관의 경우 다음 <Table 2>와 같이 코호트 생존함수가 지수 함수에 비해 높은 상관성을 보인다. 하지만 두가지 함수사이의 상관 계수 및 평균제곱오차의 차이가 크지 않기 때문에 계산의 편의를 위하여 송수관과 동일하게 코호트 생존 함수를 적용하여 관 파손확률을 산정 하였다.

4.1.2 관 파손복구시간 산정 결과

먼저 관경에 따른 최근 5년 동안의 관 파손에 대한 관 파손복구시간의 분포를 다음 <Fig. 5>에 나타내었다. 분포에 사용된 자료는 송수관의 누적사고건수 181건과 배수관의 누적사고건수 586건이며, 이 중 누락된 자료와 이상값을 배제하고 남은 유효사고건수의 분포를 나타내었다. 그 결과, 관경 200 mm 이상에서 발생한 유효사고건수가 158건으로 나타났다.

YD4의 관경이 200 mm이므로, 관경 200 mm 이상의 자료를 추출하여 분류한 후 평균 관 파손시간을 산정하였으며 다음 <Table 3>에 나타내었다. 관 파손복구시간은 매설조건에 따라 편차가 심하다. 관경이 커질수록 내부에 작용하는 수압이 세고 파손의 영향이 크기 때문에 평균 관 파손복구시간이 증가하는 경향이 있다.

4.1.3 결함트리분석을 이용한 단수 리스크 산정 결과

결함트리분석을 이용하여 W배수권역의 현재 단수 리스크(R_c)를 산정하기 위해 W배수권역은 고립되어 있다고 가정하였다. 다음 <Table 4>는 연구대상지역에서 정수장에서 6개 Zone까지의 관로를 13개로 구분하여 단위길이당 파손확률(y), 관 파손확률(λ_{pp}) 및 관 파손복구시간(τ_{TP})을 산정한 결과이다. 여기서, 단위길이당 관 파손확률이 0.0085건/km/yr라면 동일한 조건에서의 1 km의 관이 1년 동안 0.0085건의 파손이 일어날 수 있다는 것을 의미이다.

연구대상지역의 관로 중 WD3의 관 파손확률이 가장 높지만, 관 파손복구시간은 관경이 큰 YT, WT이 더 큰 것으로 나타났다. 그러므로 단

Table 2. Summary of pipe failure probability models in water distribution pipes

Category	Cohort	Exponential
Equation	$y = \frac{0.5499e^{0.5499(t+0.0844)}}{114,794.16 + e^{0.5499(t+0.0844)}}$	$y = 6.9 \times 10^{-7} e^{0.3469t}$
R	0.8082	0.5765
S.E.	0.2540	0.2959
M,S,E.	0.0389	0.1327

*R : Correlation coefficient, S.E. : Standard Error, M,S,E. : Mean Square Error

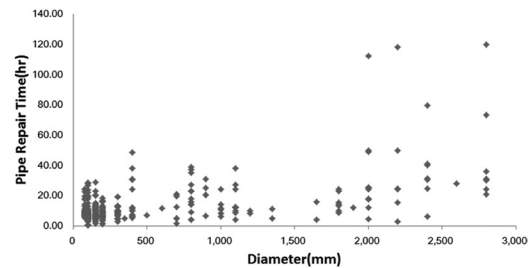


Fig. 5. Distribution of pipe repair time by diameter.

Table 3. Pipe repair time by classifying diameters

Category	N (Number)	Min. (hr)	Max. (hr)	Mean (hr)	S.D.	Var.	Ske.	Kur.
over 1,000	33	4.00	49.67	16.94	11.417	130.39	1.540	2.367
under 1,000 - over 500	33	1.50	39.00	16.72	9.901	98.02	.567	-.274
under 500 - over 300	39	3.00	48.50	12.22	9.733	94.72	2.261	5.174
under 300 - over 200	53	1.17	18.33	8.04	3.623	13.13	.916	.906

*N : Number of Variables, Min. : Minimum, Max. : Maximum, S.D. : Standard Deviation, Var. : Variance, Ske. : Skewness, Kur. : Kurtosis

Table 4. Current failure probability for each pipes

Pipe ID	y (N/km/yr)	λ_{PP} (N/hr)	τ_{TP} (hr/N)
YT	0.0085	0.00000660	16.95
WT	0.0172	0.00000982	16.95
NT	0.0016	0.00000019	16.88
YD1	0.0058	0.00000090	12.22
YD2	0.0019	0.00000009	12.22
YD3	0.0058	0.00000037	12.22
YD4	0.0058	0.00000028	8.04
WD1	0.2544	0.00001707	16.95
WD2	0.2544	0.00001278	16.95
WD3	0.4496	0.00003601	16.72
WD4	0.4496	0.00008401	16.72
WD5	0.4496	0.00000009	16.72
WD6	0.2544	0.00000004	16.72

순하게 관 파손확률 및 관 파손복구시간의 값으로 W배수권역의 단수 리스크를 도출할 수는 없다. 따라서 정량적인 단수 리스크 평가를 위해 결합트리분석에 의한 리스크 개념을 도입하였으며, 각각의 연구대상 관로의 단위길이당 관 파손확률, 관 파손확률 및 파손복구시간을 변수로 하여 각각의 Zone별 단수 리스크를 산정하였다.

〈Table 5〉는 결합트리를 통해 단수 리스크를 산정에 필요한 단수 확률과 단수 지속시간에 대한 변수를 산정하기 위한 것이다. 결합트리분석에 의한 단수 확률과 단수 지속시간 산정은 결합트리 구조의 아래에서 위로 순차적으로 해 나가면 된다. 이를 표로 나타내기 위해서 결합트리에서의 순차적 계산을 왼쪽에서 오른쪽으로 진행하였다. 그러므로 〈Table 5〉에서 D Zone을 예

Table 5. Process of FT calculation to estimate current risks

Category			AND		OR		OR	
	λ_{PP}	τ_{TP}	λ_{PP}	τ_{TP}	λ_{PP}	τ_{TP}	λ_{PW}	τ_{TW}
A Zone								
YT	6.60E-06	16.95	-		-		1.56E-04	16.61
YD(1,2,3,4)	1.49E-04	11.18						
B Zone								
WT	9.82E-06	16.95	-		-		2.69E-05	16.95
WD(1)	1.71E-05	16.95						
C Zone								
WT	9.82E-06	16.95	-		-		3.18E-05	16.90
WD(1,2,3)	2.20E-05	16.87						
D Zone								
WT	9.82E-06	16.95	-		-		4.73E-05	16.86
WD(1,2,3,4)	3.75E-05	16.84						
WD(5)	9.30E-08	16.72	1.23E-13	8.36	3.75E-05	16.83	4.73E-05	16.86
WD(6)	3.95E-08	16.72						
E Zone								
WT	9.82E-06	16.95	-		-		4.73E-05	16.86
WD(1,2,3,4)	3.75E-05	16.84						
WD(5)	9.30E-08	16.72	1.23E-13	8.36	3.75E-05	16.83	4.73E-05	16.86
WD(6)	3.95E-08	16.72						
F Zone								
WT	9.82E-06	16.95	-		-		4.73E-05	16.86
WD(1,2,3,4)	3.75E-05	16.84						
WD(5)	9.30E-08	16.72	1.23E-13	8.36	3.75E-05	16.83	4.73E-05	16.86
WD(6)	3.95E-08	16.72						

로 들면, 하단의 WD(5)와 WD(6)의 AND 게이트 계산을 하여 나타내고, 그 위의 WD(1,2,3,4)와의 OR 게이트 계산을 하여 우측에 나타내고, 마지막으로 WT와 OR 게이트 계산을 하여 또 우측에 나타내는 방식으로 결합트리를 계산해 나가게 된다. 따라서 가장 우측에 나타난 값이 결합트리분석을 통한 D Zone에서의 단수 확률 및 단수 지속시간이 된다.

따라서, D Zone의 결합트리분석을 수행한 결과, 유입되기 전의 관로가 파손될 경우 D, E, F Zone 모두 단수가 발생하게 되므로 D Zone의 단수 확률과 단수 지속시간이 같은 값을 보인다. 여기서 D, E, F Zone의 단수 확률은 $4.73E-05$ 건/hr(=0.41건/yr)으로 1시간 동안 단수가 $4.73E-05$ 건 발생할 수 있다는 것을 의미하고, 1년으로 환산하면 0.41건이 발생할 수 있다는 것이다. 단수 지속시간은 각각 16.86시간이므로 1건의 단수가 발생했을 때 단수가 16.86시간 동안 발생한다는 것을 의미한다.

하지만, 단수 확률과 단수 지속시간의 단순한 비교로는 어느 Zone에서 단수로 인한 영향을 가장 많이 받는지 알 수 없다. 따라서 단수 확률과 단수 지속시간과 해당되는 Zone의 수요량을 곱하여 단수 리스크를 산정함으로써 정량적 지표를 사용하여 단수로 인한 영향을 비교 가능하도록 하였다.

이와 같은 방법으로 각 Zone별 단수 리스크를 산정하면 다음 <Table 6>과 같이 나타낼 수 있다. A ~ F Zone 중 단수 리스크가 가장 큰

Zone은 $9.09 \text{ m}^3/\text{day}$ 인 D Zone으로 나타났으며, A Zone은 $0.48 \text{ m}^3/\text{day}$ 으로 단수 리스크가 가장 작게 나타났다. 이들 각각의 Zone에 대한 단수 리스크는 각각의 Zone에 연결된 송수관과 배수관의 파손확률과 관로별 파손복구시간 그리고 송·배수관망의 구조적 특성에 따라 다르게 산정되는 것을 알 수 있었다.

4.2 단수 리스크 저감을 위한 시나리오 분석 결과

단수 리스크 저감을 위해 관로 교체와 배수권역 연계 2가지의 시나리오로 나누어 분석하였다. 이에 따라 시나리오별 단수 리스크와 단수 리스크 저감량을 산정하였으며, 우선순위를 구함으로써 단수 리스크 저감을 위한 최적 방안을 도출하였다.

4.2.1 관로 교체에 의한 단수 리스크 저감 시나리오 분석 결과

관로 교체의 우선순위를 정하기 위해 먼저 현재 상태에서 각각의 해당 관로만을 교체했을 경우 6개 Zone의 리스크 합을 살펴보았다. 다음 <Table 7>에 누적 관로 교체 우선순위에 대한 단수 리스크 값을 나타내었다. 그 결과 WD4 관로를 교체할 경우 $7.02 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 가장 많은 단수 발생량을 줄일 수 있는 것으로 나타났으며, 6번째 우선순위인 YT관로를 교체할 경우 0에 가까운 만큼의 단수 발생량을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 즉, 관로 교체에 대한 우선순위가 낮

Table 6. Current risks for water suspension in each Zones

Zone	R_c (m ³ /day)	λ_{PW} (N/hr)	τ_{TW} (hr/N)
A	0.48	1.56E-04	11.42
B	4.06	2.69E-05	16.95
C	4.86	3.18E-05	16.90
D	9.09	4.73E-05	16.86
E	3.08	4.73E-05	16.86
F	3.66	4.73E-05	16.86
Total	25.23	-	-

Table 7. Risks and risk reductions of water suspension in all Zones by setting a priority of pipe replacement

Priority	Scenario	R_{PR} (m ³ /day)	R_{RP} (m ³ /day)
0(current)	-	25.23	-
1	WD4	18.21	7.02
2	WT	11.94	6.27
3	WD1	7.06	4.88
4	WD3	2.22	4.84
5	WD2	0.50	1.72
6	YT	0.47	0.03

을수록 막대한 교체비용을 투입될 수 있으므로 향후, 관로 교체에 대한 경제성 평가를 진행하여 효율적인 관로 교체 물량을 산정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.2.2 배수권역 연계에 의한 단수 리스크 저감 산정 결과

(1) 배수권역 연계에 의한 세부 시나리오별 결합트리 구조화

배수권역 연계에 의한 시나리오는 W배수권역 인근에 위치하고 수리학적으로 물공급이 가능한 N배수권역을 연계하여 배수권역 연계를 통한 단수 리스크를 산정하였다. N배수권역으로부터 연계가 가능한 3가지 경로가 있으므로 배수권역 연계는 총 15가지의 경우의 수가 존재한다. 그러나 본 연구에서는 배수권역 연계에 의해 직접적으로 물공급이 이루어지는 하나의 Zone에서의 단수 리스크만 산정하였으며, 다른 Zone에는 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 대신 비상연결관 매설이 가능한 곳에 비상연결관을 연결하여 하나의 경로를 추가한 총 4가지 경로에서 배수권역 연계는 총 31가지의 경우가 존재하

는 것으로 하였다. 따라서 배수권역 연계에 대해서는 4가지의 세부적인 시나리오가 발생하게 되며 이들 각각에 대한 물공급 경로와 결합트리 구조는 다음 <Fig. 6>과 같다.

(2) 배수권역 연계에 의한 세부 시나리오별 분석 결과

배수권역 연계에 대한 4가지 세부 시나리오별 단수 리스크를 산정하였으며, 이를 이용하여 단수 리스크 저감량(R_{RC})을 산정할 수 있었다. 배수권역 연계에 의한 단수 리스크 저감량(R_{RC})은 현재 단수 리스크(R_C)와 배수권역 연계에 의한 단수 리스크(R_{DC})의 차로써 다음 <Table 8>과 같이 산정되었다.

Table 8. Risk reductions of water suspension affected Zones by district connection

Scenario	Zone _{affected}	R_C (m ³ /day)	R_{DC} (m ³ /day)	R_{RC} (m ³ /day)
2-1	B	4,064579	1,82E-05	4,064561
2-2	C	4,857425	6,34E-05	4,857361
2-3	D	9,086286	8,77E-05	9,086198
2-4	D	9,086286	1,15E-04	9,086171

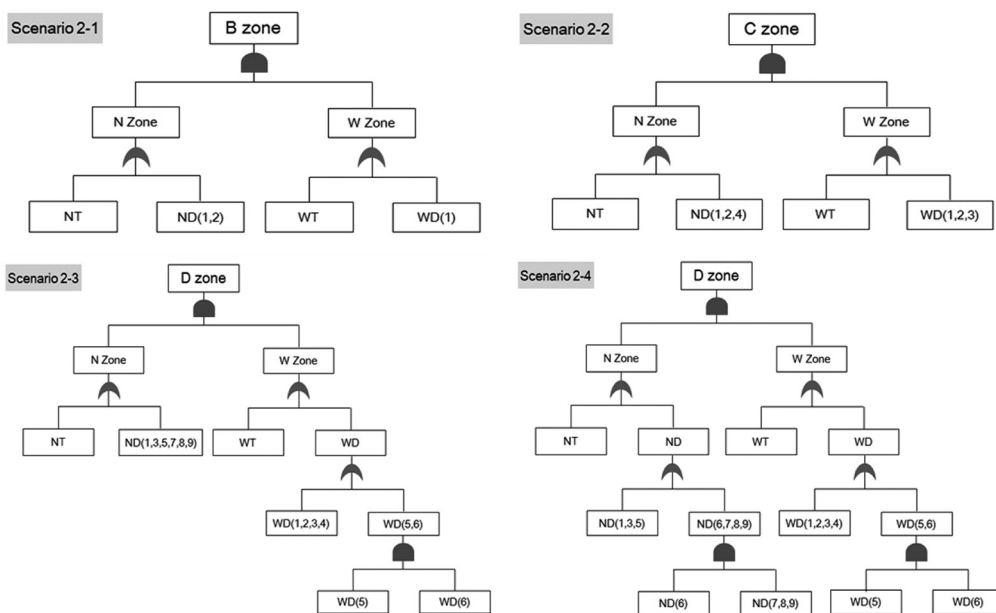


Fig. 6. Structure change of FT scenario 2.

Table 9. Risks of water suspension in all Zones by district connection

Scenario	R_{DC} (m ³ /day)
2-1	21.17
2-2	20.37
2-3	16.14
2-4	16.14

Table 10. Risks and risk reductions of water suspension in all Zones by setting a priority of district connection

Priority	Scenario	R_{DC} (m ³ /day)	R_{RC} (m ³ /day)
0(current)	-	25.23	-
1	2-3	16.14	9.09
2	2-2	11.28	4.86
3	2-1	7.22	4.06

위 결과는 배수권역 연계에 의해 영향을 받는 Zone에 대한 단수 리스크 저감량을 산정한 것으로서 배수권역 연계에 따른 6개 Zone 전체의 단수 리스크는 다음 <Table 9>와 같이 계산할 수 있었다.

결과적으로 시나리오 2-3 D Zone에 연계했을 때 단수 리스크의 값이 가장 적게 나타났으며, 두 번째는 시나리오 2-2 C Zone 연계, 세 번째는 시나리오 2-1 B Zone 연계의 순으로 나타났다. 다음 <Table 10>에 우선순위별 단수 리스크와 단수 리스크 저감량을 산정하여 나타냈으며, 그 결과 시나리오 2-3의 D Zone으로 배수권역을 연계한 경우 단수 리스크가 기존보다 1/3가량 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 결함트리분석을 이용하여 상수관망에서의 단수 리스크를 평가하고, 이를 통해 단수 리스크를 최소화하기 위한 정량적 지표를 개발하고 적용하였다. 또한 연구대상지역의 단수 리스크를 기준으로 하여 단수 리스크 저감을 위한 시나리오 분석(관로 교체 및 배수권역 연계)을 통해 단수 리스크를 최소화하고자 하였다.

본 연구에서는 연구대상지역을 구조적으로 동일하거나 네트워크로 연결된 곳은 하나로 묶어 6개의 Zone(A, B, C, D, E, F)으로 구성하였다. 결함트리분석을 이용하여 6개 Zone 전체에 대한 단수 리스크를 계산한 결과 총 25.23 m³/day로 나타났다.

그리고, 단수 리스크 저감을 위해 관로 교체 시나리오 분석에서 관로 교체에 의한 단수 리스크 저감량 크기에 따라 관로 교체의 우선순위를 산정하였다. 그 결과, WD4를 교체할 경우 7.02 m³/day만큼의 단수 발생량을 절감할 수 있어 가장 많은 단수 리스크 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 배수권역 연계를 통한 단수 리스크 저감 시나리오를 분석한 결과, 단수 리스크 저감량은 시나리오 2-3, D Zone으로 배수권역을 연계하는 것이 전체 단수 리스크를 16.14 m³/day로 기존의 전체 단수 리스크에 비해 1/3 가량 저감 되는 것으로 나타났다.

따라서 관로 교체에 의한 단수 리스크 저감 시나리오와 배수권역 연계에 의한 단수 리스크 저감 시나리오를 분석한 결과, 단수 리스크 저감 효과가 가장 큰 시나리오부터 순차적으로 산정할 수 있었으며, 단수 리스크 저감을 위한 최적 방안을 도출할 수 있었다.

하지만 본 연구에서 적용된 단수 리스크 저감 방법은 관 파손확률과 단수 리스크에 대한 전과정 평가가 고려되지 않아 하나의 시점에서만 적용되는 한계가 있었다. 즉 관로의 경우 시간이 지나게 되면 노후화가 진행되어 관 파손확률이 높아지게 된다. 그렇게 되면 단수 리스크 또한 변화하게 된다. 그리고 본 연구에서는 시나리오별 단수 리스크 저감 방안 선정시 단수 리스크 저감량 순으로 시나리오의 우선순위를 결정하도록 하였다. 하지만 관로 교체나 비상연결관 매설시 각각의 시나리오별 비용차이가 발생하기 때문에 비용/편익 분석이 고려되어야 만 최적의 단수 리스크 저감 방안을 결정할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서 개발된 단수 리스크 평가 모델

에 전과정 평가와 비용/편익 분석을 추가적으로 고려한다면 자산관리 측면에서 상수관망의 리스크 평가 모델로써 충분히 활용할 가치가 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2013년도 서울시립대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.

References

- Ostfeld, A. (2004) "Reliability analysis of water distribution systems", *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 6, No. 4, pp. 281-294.
- Wagner, J., Shamir, U. and Marks, D. (1988) "Water distribution system reliability: analytical methods", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 114, No. 3, pp. 253-275.
- Goulter, I. D. and Bouchart, F. (1990) "Reliability constrained pipe network model", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 2, pp. 221-229.
- Isoyama, R., Ishida, E., Yune, K. and Shirozu, T. (2000) "Seismic damage estimation procedure for water supply pipelines", Proceeding of the 12th World Conference of Earthquake Engineering(WCEE), Auckland, New Zealand, January 1~4, paper no. 1762.
- Wang, Y. and Au, S. K. (2009) "Spatial distribution of water supply reliability and critical links of water supply to crucial water consumers under an earthquake.", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, pp. 534-541.
- Cullinane, M. J. (1986) "Hydraulic reliability of urban water distribution systems", Water Forum 86: World Water Issues in Evolution Conference.
- Bao, Y. and Mays, L. W. (1990) "Model for water distribution system reliability", *Journal of Hydraulic engineering*, Vol. 116, No. 9, pp.1119-1137.
- Shinstine, D. S., Ahmed, I. and Lansley, K. E. (2002) "Reliability/availability analysis of municipal water distribution network: Case studies", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128, No. 2, pp. 140-151.
- Choi, T. H., Koo, J. Y. (2013) "A water supply risk assessment model for water distribution network, *Desalination and Water Treatment*, Published online.