

# 상수관 파괴시 관망의 부분적 격리를 고려한 피해범위 산정

## An evaluation of the pipe failure impact in a water distribution system considering subsystem isolation

전 환 돈\*

Jun, Hwandon

### Abstract

To evaluate the pipe failure impact, current methodologies consider only a broken pipe as the impacted area. However, these approaches are accurate if the broken pipe is the only area isolated from the system. Depending on the number and locations of on-off valves, more pipes which are adjacent to a broken pipe may be isolated. Using the concept of Segment suggested by Walski, the methodology evaluating the pipe failure impact incorporated with on-off valve locations has been suggested by Jun. However, a segment cannot account for all possible pipe failure impacted areas since it does not consider additional failures, namely the network topological failure and the hydraulic pressure failure. For this reason, a methodology which can consider the network topology and hydraulic pressure limitation as well as on-off valve locations is suggested. The suggested methodology is applied to a real network to verify its applicability. As results, it is found that a single pipe failure can affect huge areas depending on the configuration of on-off valves and the network topology. Thus, the applicability of the suggested methodology for evaluating the pipe failure impacts on a water distribution network is proved.

**keywords** : Pipe network, Segment, Isolation, Pipe failure impact, Hydraulic pressure failure

### 요 지

기존의 상수관 파괴로 인한 피해 영역의 산정에서는 파괴된 관만을 피해영역으로 고려하였으나 이는 파괴된 관만이 차폐되었을 경우에만 정확하다 할 수 있다. 차폐에 이용되는 밸브의 배치에 따라 추가로 더 많은 관들이 파괴된 관과 함께 차폐가 될 수 있으며 Walski에 의하여 제안된 segment 개념으로 이러한 추가적인 관의 차폐를 고려할 수 있는 방법이 Jun에 의해서 개발되었다. 그러나, segment 개념으로 찾아질 수 있는 피해영역보다 더 많은 부분이 관 파괴의 영향을 받을 수 있으며, 이는 관들의 연결형상에 의한 차폐와 용수 수요지점에서 적절한 압력수두를 확보하지 못하여 발생하는 추가적인 피해에 기인한다. 본 연구에서는 밸브의 위치에 따른 추가적인 피해영역과 함께 관들의 연결형상 그리고 압력수두에 따른 피해를 순차적으로 고려할 수 있는 방법을 제안하여 제안된 방법을 실제 상수관망에 적용하여 적용성을 검토한다. 실제 상수관망에 적용한 결과 한 개의 상수관 파괴에 의한 피해 영역이 밸브위치와 용수노선의 설계에 따라 많은 지역에 피해를 발생 시킬 수 있음을 보여 주고 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 방법을 적용하여 산정된 상수관 파괴에 따른 피해영역이 현실을 정확히 반영함을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 관망, Segment, 부분 격리, 관 파괴, 피해영역, 관 연결형상, 압력수두 피해

\* 고려대학교 사회환경시스템공학과 연구교수 (e-mail: hwandonjun@korea.ac.kr)

Ph.D, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and University, USA

## 1. 서론

용수공급시스템을 구성하는 상수관의 파괴는 빈번하게 발생하며, 관 파괴 시에 수리 또는 교체를 위해 관망의 일부는 차폐가 되어 해당영역의 용수 수요자는 파괴부분의 복구 시까지 단수가 불가피하게 된다. 상수관을 관리하는 지자체나 회사에게 용수 수요자에 대한 용수 공급 중단은 시스템의 신뢰성 저하, 복구기간동안의 금전적 손실 그리고 사회적 문제를 야기할 수 있다. 노후한 관 또는 다양한 원인에 의하여 발생하는 상수관의 파괴는 피할 수 없는 문제이기 때문에 파괴 시 손실을 최소화 할 수 있는 방안을 마련은 중요한 문제이다.

피해 영역의 정확한 예측은 실제 피해 예측뿐 아니라 적절한 유지관리 계획의 수립에도 매우 중요하다. 이는 각 상수관의 파괴 시 나타날 수 있는 정확한 피해 예측 범위를 산정하여 이를 바탕으로 중요한 상수관, 즉 파괴 시 큰 피해를 발생 시킬 수 있는 상수관을 우선적으로 유지, 보수하여 파괴가능성을 최소화 할 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 상수관 파괴 시 정확한 피해 영역 예측은 상수관 발생 시 나타나는 피해의 최소화와 중요한 상수관의 파괴를 미연에 방지하는 효율적인 유지보수 계획의 수립에 중요한 역할을 한다.

상수관 파괴에 따른 피해 영역 산정은 중요한 문제로 이에 대한 많은 연구가 수행되었다. Su et al. (1987)은 관망을 구성하는 각각의 상수관이 차례로 파괴되었다고 가정하고 파괴된 관을 제외하고 수리학적 모의(hydraulic simulation)를 실시하여 용수수요지점의 압력수두 변화를 측정하여 상수관망의 신뢰성 분석(reliability analysis)을 실시하였다. Jowitt and Xu (1993)은 Su et al. (1987)의 연구와 같이 각각의 상수관을 차례로 파괴되었다고 가정하여 수리학적 모의를 실시하였으며 수요지점에서 압력수두가 기준치보다 저하되면 파괴로 가정된 관과 그 수요지점을 피해 영역으로 가정하였다. 이 때, 상수관의 운영조건을 정상조건(normal condition)과 비정상조건(abnormal condition)으로 구분하여 비정상 조건은 상수관망 구성요소의 파괴나 고장 시에 발생한다고 가정하였다. Jowitt and Xu. (1993)과 Su et al. (1987)의 연구는 본 논문에서 제안된 네 가지의 가능한 피해 영역 중에서 한 개의 관으로 이루어진 파괴지점과 압력수두 저하조건만을 고려하여 피해 영역을 산정하였으며 파괴된 관을 차폐하기 위한 밸브의 위치와 수를 고려하지 않았다.

피해 영역의 정확한 산정은 상수관의 신뢰성 연구에 있어 매우 중요한 문제이다. Mays(1996) and Bouchart add Goulter. (1991)에 의하면 상수관망의 신뢰성에 대

한 정의는 상수관망을 이루는 구성요소의 신뢰성(mechanical reliability)과 수리학적인 신뢰성(hydraulic reliability)의 두 가지로 나누어질 수 있다. 상수관, 펌프, 탱크 및 연결부 등의 파괴는 상수관망 구성요소 파괴의 대표적인 예이며, Mays(1996)는 이러한 상수관망 구성요소에 의한 신뢰성을 “상수관망의 장기간 운영에서 각 구성요소가 연속적으로, 필요로 하는 용수공급을 갖춘 수리나 교체 없이 제공할 수 있는 능력”이라 정의하였다. 수리학적인 신뢰성은 “용수 수요 지점(demand node)에 정하여진 수량을, 적절한 압력수두를 확보하여 공급할 수 있는 능력”으로 정의하였다. 이와 같은 두 가지 상수관망의 신뢰성은 Goulter and Coals(1986), Bao and Mays(1990), Fujiwara and Tung(1991), Yang et al. (1996), Khomsi et al. (1996) 등에 의해 연구목적에 따라 다르게 사용되었다.

상수관 파괴에 의한 신뢰성 산정을 위한 개념으로 본 연구에서 제안된 segment에 의한 피해 영역 산정은 상수관망 구성요소에 의한 신뢰성 산정에 해당하며, 압력수두 저하에 의한 피해 영역 산정은 수리학적인 신뢰성 산정 해당하게 된다. 그러나, 상수관 파괴에 의한 피해 영역의 정확한 산정을 위해서는 전술된 두 개의 기준인 파괴된 한 개의 상수관과 압력수두 저하에 따른 피해 영역 외에 추가적인 기준의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 Walski(1993a,b)에 의해 제안된 segment의 개념을 적용한 피해영역산정 기준과 비의도적 구역고립(unintended isolation) 개념을 적용한 피해영역산정 기준과 같이 실제와 근접한 피해 영역산정 방법을 제안하였다. 각각의 기준에 따른 피해 정도는 상수관 파괴로 영향을 받게 되는 총 용수 수요자의 수로서 수량화 하였다.

## 2. 피해영역의 산정

본 연구에서는 상수관 파괴에 의한 피해영역 산정을 위해 4가지 기준을 적용하였으며, Fig. 1과 같이 20개의 관, 14개의 수요지점(절점2~15), 1개의 수원(절점 1) 및 17개의 밸브로 구성된 상수관망을 예로 각각의 기준 적용 예를 나타내었다.

### 2.1 피해영역 기준 1: 파괴된 상수관

상수관이 파괴되면 해당 관에서 물을 공급 받는 수요자는 물공급을 받을 수 없게 되므로 파괴된 상수관 자체가 직접적인 피해 영역이 된다. Su et al. (1987), Jowitt and Xu (1993)과 같은 기존의 연구에서는 파괴된 상수관만을 피해 영역으로 산정하거나 파괴에 따른 수리학적 모의에 이용하였다.

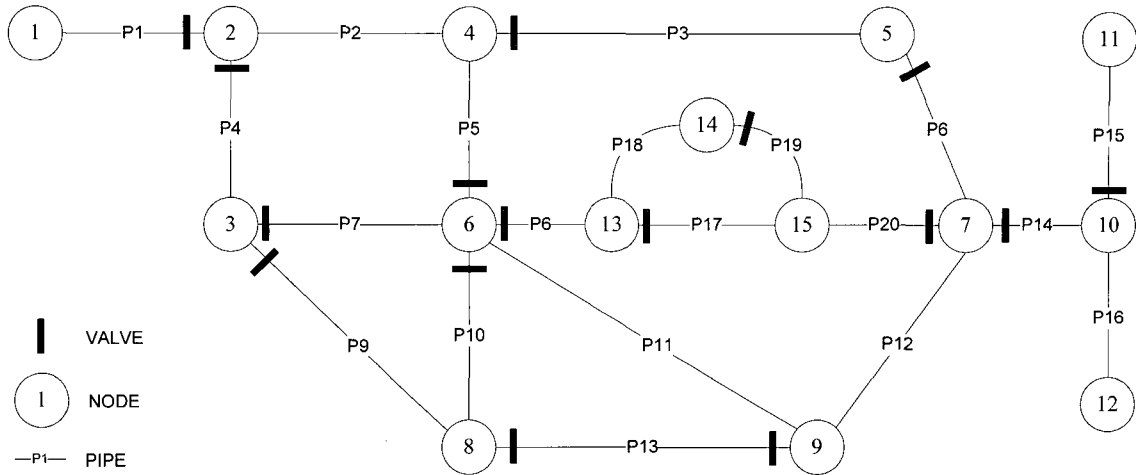


Fig. 1 Sample Network

## 2.2 피해영역 기준 2: 상수관망의 segment

Segment 개념은 Walski(1993a,b)에 의해서 제안되었으며, 실제적인 밸브와 상수관망의 부분적 격리를 분석하기 위하여 제안되었다. Segment는 관의 파괴 시 파괴된 관과 함께 밸브에 의해서 차폐되는 주변관의 집합으로 정의할 수 있으며 파괴된 관이 두개의 밸브를 양 끝에 가지고 있는 경우 이 관은 하나의 segment로 정의할 수 있다. 즉, 한 관을 격리시키기 위해 그 관에 인접한 관들도 함께 격리해야할 경우 함께 격리되는 관들을 하나의 segment로 정의할 수 있다. Segment의 개념을 이용해 Fig. 1의 상수관망을 구분하여 Fig. 2에 나타내었다. P2가 파괴되는 경우 보수를 위해 V1, V2, V4, V6의 4개 밸브가 차폐되어야 하며 이때 P5 또한 P2와 함께 차폐된다. P5 파괴 시에도 P2 역시 차폐되며, 이와 같이 P2와 P5는 한쪽이 파괴될 때 함께 차폐되므로

한 개의 segment인 S2로 정의할 수 있다.

Fig. 2의 상수관망은 소규모 상수관망으로 쉽게 전체 segment를 산정할 수 있으나 실제 관망의 경우 수작업에 의한 segment 산정 방법은 효율적이지 못할 것이다. Jun et al. (2005) 및 Jun (2005)은 상수관망내의 segment를 자동으로 산정하기 위해 graph theory에서 매트릭스를 나타내는 기법인 node-arc matrix (A matrix)를 바탕으로 같은 매트릭스 구조를 가지는 valve location matrix (B matrix) 및 valve deficiency matrix (C matrix)로 구성되는 matrix algorithm을 개발하였으며, 실제 관망에서 효율적으로 적용하였다.

Segment의 개념을 도입하여 상수관 파괴로 인한 피해영역을 산정할 경우 하나의 관 파괴로 인한 피해영역의 산정과 다른 결과를 보인다. 밸브의 위치에 따라 한 개의 관 파괴에 의하여 실제 차폐되는 영역은 달라지며, P6, P7, P11, P12로 구성되는 segment S5의 경우 어느

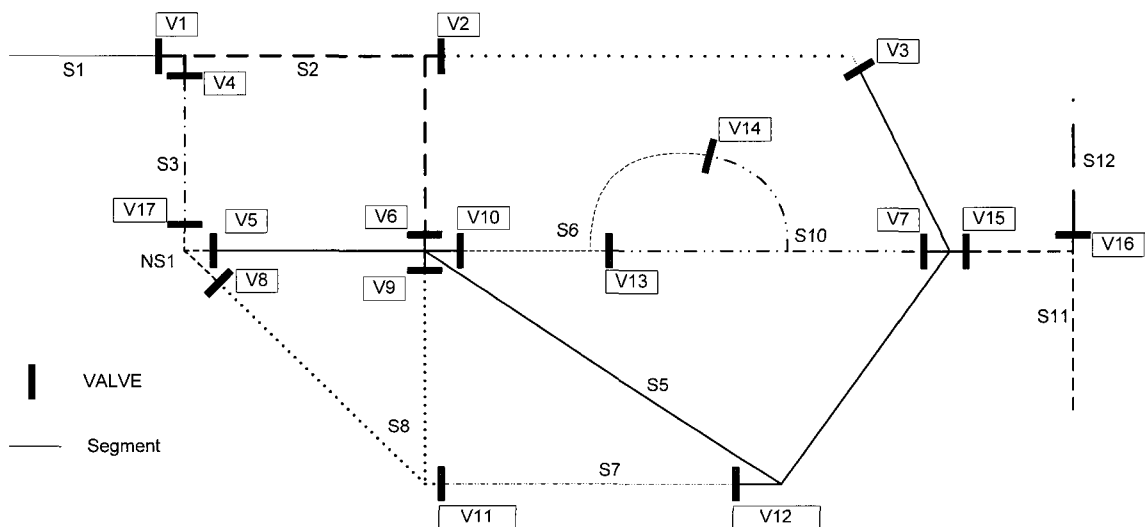


Fig. 2 Identified segments in the sample network

한 개 관의 파괴로 인하여 나머지 3개의 관 모두가 차폐가 된다. 이때 실제적인 관 파괴에 의한 피해 영역은 4개의 관으로 이루어지는 segment S5가 될 것이다.

### 2.3 피해영역 기준 3: 비의도적 구역고립 (Unintended Isolation)

#### 2.3.1 비의도적 구역고립의 정의

상수관 파괴 시 복구를 위하여 파괴된 관을 포함한 segment를 차폐할 경우, segment가 차폐되었기 때문에 segment에 연결된 하단부 관들은 수원(水原)으로부터의 용수공급이 중단될 수 있다. 즉, 특정 관들은 segment가 수원으로부터 유일한 용수공급 노선(path)일 경우, segment의 차폐로 인하여 해당 관들의 용수공급 노선(path)에 단절이 발생한다. 이러한 영역을 비의도적 구역고립 (Unintended isolation)으로 정의할 수 있으며, 비의도적 구역고립이 발생할 경우 이 영역에 있는 용수 수요자는 파괴된 상수관의 복구까지 용수공급을 받지 못하므로 비록 밸브에 의해서 차폐(segment) 되지는 않았으나 segment내에 있는 용수 수요자와 마찬가지로 용수공급을 받을 수 없게 된다. 비의도적 구역고립은 상수관망에서 loop나 상수원까지 두 개 이상의 용수공급노선(path)이 없는 경우에 많이 발생하며 Fig. 3은 segment S5가 차폐되는 경우 용수공급노선이 단절되는 상수관망의 비의도적 구역고립을 나타내고 있다.

Fig. 3은 두 종류의 비의도적 구역고립을 보여주고

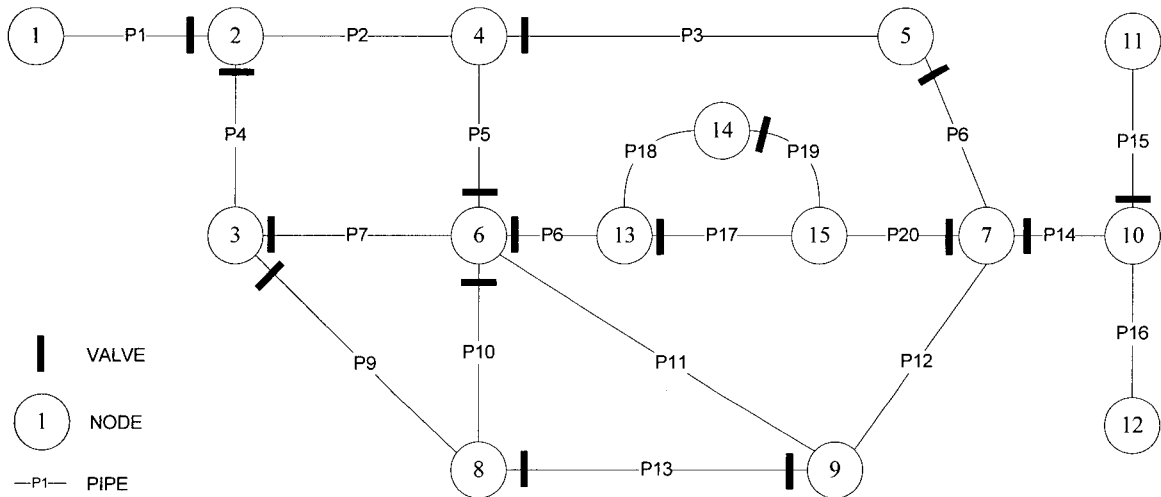


Fig. 3 Examples of the unintended isolation in the sample network

Table 1. Different failure ranges of P6 failure depending on the failure criteria

기존의 방법 (파괴된 관만 고려)	Segment 만 고려	Segment와 비의도적 구역고립 고려
{P6}	{P6, P7, P11, P12}	{P6, P7, P11, P12} ∪ {P8, P14, P15, P16, P17, P18, P19, P20}

있으며 section A와 section B는 다른 원인에 의해서 용수공급 노선이 단절되었다. Section A의 경우 segment S5에 의해 둘러 싸여 있으므로 용수공급 노선이 단절되며, section B의 경우 S5 외부에 위치하지만 P6와 P12가 S5내에 포함되어 있으므로 용수공급 노선이 단절되어 수원으로부터 물 공급이 차단된다. Section B는 수지형 관망(branch system)에서 자주 발생하는 비의도적 구역고립이며 추가적인 용수공급 노선(alternative path)이 보장되어 있지 않기 때문에 발생한다. Section A인 경우 자주 발생하지는 않으나 loop형 관망에서 나타날 수 있으며 수작업으로 판별하기 어려운 경우가 많다. 두 개의 비의도적 구역고립은 다른 원인으로 인해 발생하였으나 해당 영역내의 용수 수요자가 segment S5의 차폐로 인하여 물 공급이 중단된 점은 같다. 따라서 두 영역 모두 segment S5에 의해 발생하는 피해영역으로 산정되어야 한다. Table 1은 P6의 파괴 시 발생하는 피해영역 산정 결과를 피해영역 기준 별로 비교해 나타내고 있다.

Table 1에 나타난 것과 같이 실제적인 피해 영역은 segment만 고려한 경우와 segment 및 비의도적 구역고립을 동시에 고려한 경우 많은 차이를 나타내고 있다. 따라서 보다 정확한 상수관 파괴에 의한 피해영역 산정을 위해서는 본 연구에서 제안한 바와 같이 segment와 비의도적 구역고립을 동시에 고려하여야 할 것으로 판단된다.

### 2.3.2 비의도적 구역고립 탐색 알고리즘

Jun et al. (2005) and Jun (2005)은 segment 차폐에 의한 비의도적 구역고립의 산정을 위해 adjacent matrix를 바탕으로 한 Breadth-First search 알고리즘 (Ahuja et al., 1993)을 적용하였다. Breadth-First search 알고리즘은 네트워크에서 두 개 절점사이의 연결(connectivity) 유무를 결정하는 알고리즘이며 상수관망의 경우 수원에서 각 용수수요 절점(demand node) 사이의 연결 유무를 결정하는데 사용되었다. Breadth-First search 알고리즘 적용을 위해서는 상수관 파괴로 인하여 발생하는 segment 산정이 선행되어야 하며 산정된 segment를 바탕으로 상수관망의 위상(network topology)을 절점(node)과 절점으로 나타내는 adjacent matrix를 수정하는 과정을 통해 비의도적 구역고립 산정이 이루어진다.

Fig. 4는 segment S5의 비의도적 구역고립 탐색과정을 나타내고 있다. Segment S5내에는 3개의 절점(node 6, 7, 9)이 포함되어 있으며 이 절점들에 연결 모든 관들을 삭제하여 Segment S5의 차폐를 고려한 수정된 adjacent matrix를 작성한다. 수정된 adjacent matrix에 Breadth-First search 알고리즘을 적용하여 최종적인

S5의 비의도적 구역고립을 산정한다. 알고리즘은 수원(水原)으로부터 시작하여 수원과 각 수요절점사이의 연결노선을 찾아낸다. Fig. 4에서 표시된 "1"의 의미는 두 개의 절점이 연결되어 있음을 의미한다. 예를 들어 노드 "8"과 "3"으로 나타나는 칸에 "1" 넣어져 있으면 이는 노드 "8"과 "3"이 상수관 (상수관 P9, Fig. 1 참조)으로 연결되어 있음을 의미한다. Fig. 1의 상수관망에서 수원은 노드 "1"에 위치하므로 노드 "1" 열에서 비의도적 구역고립을 산정하는 알고리즘이 시작된다. 노드 "1" 열에서 "1"이 노드 "2" 행에서 발견되므로 다음과정으로 탐색될 열은 노드 "2"열이다. 노드 "2"열에서는 세 개의 행에 "1"이 위치하며, 노드 "1", "3"과 "4" 행이다. 이중 노드 "1" 행은 전 단계에서 탐색이 되어있으므로 노드 "3"과 "4" 행의 "1"만이 탐색된다. 따라서 다음과정으로 탐색될 열은 노드 "3" 열과 "4"열이다. 이와 같은 과정을 통해서 비의도적 구역고립이 산정된다. 탐색 열에 포함되지 않은 노드들은 Segment S5의 비의도적 구역고립이 된다. 즉, 노드 (10, 11, 12, 13, 14, 15)는 탐색 열에 포함되지 않았으므로 비의도적 구역고립이다.

Search Level	Node	Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Level 1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Level 2	2	2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Level 3	3	3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Level 3	4	4	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Level 4	5	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+Level 5	8	8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	11	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	13	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	15	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0

Fig. 4. Example of the Breadth-First Search Algorithm to find the unintended isolation due to the isolation of S5

## 2.4 피해 영역기준 4: 압력수두 저하 영역

상수관 파괴로 인하여 발생하는 피해 영역은 밸브의 위치와 수(segment) 및 상수관망의 위상(network topology)에 따른 영향(비의도적 구역고립)에 따라서 달라지며 특정된 상수관망이 부분적으로 차폐되면 차폐된 부분에 의하여 상수관망 전체의 수리학적 조건이 변화가 발생한다. 상수관망에 발생하는 중요한 수리학적 변화 중의 하나는 용수수요지점의 압력수두의 변화이다. 압력수두의 변화는 두 가지로 나타날 수 있다.

첫째, 압력수두가 설계수두 보다 낮게 변할 수 있으며 이 경우 실질적인 용수사용상에 제약이 따른다. 예를 들어 화재가 발생할 경우 소화전의 압력이 저하되면 화재 진압용수로 사용을 할 수 없게 된다. 이러한 이유로 소화전등의 상수관망의 말단부에서의 압력수두는 일정부분 이상으로 유지하도록 규정되어 있다. 미국의 경우 최저 수압을 20psi 에서 25psi를 최소한의 압력수두로 유지하도록 (Moulton Niguel Water District (1997), Willington Town, (2001)) 권고하고 있으나, 일반적인 용수 사용성(service quality) 확보를 위하여 40psi를 권장하고 있다 (Walski et al., 2001). 한국의 경우 상수도 시설기준(환경부, 1998)에 의하면 관내 최소 압력을 1.5kg/cm<sup>2</sup>로 규정하고 있다.

두 번째는 압력수두 값이 정상조건에서 보다 크게 변하는 경우이다. 이 경우 증가된 압력 때문에 상수관망에서 약해진 부분에서 추가적인 누수나 파괴가 일어날 수 있다.

화재발생시 필요한 압력수두가 부족하거나 일반 가정에서 물 사용 시 수압이 낮은 경우 용수의 사용성이 현저히 떨어질 수 있으며 이러한 영역도 피해 영역으로 산정해야 할 것이다. 물론 이러한 부분은 segment나 비의도적 구역고립에 포함되지 않으므로 물 공급은 계속되나 일반 가정의 경우 용수 사용성이 떨어지거나 화재 진압 시에 실제적으로 용수의 사용이 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 일반적으로 용수의 사용성은 압력수두의 저하에 의한 영향이 상승에 의한 영향보다 현저히 크며, 본 연구에서는 압력수두 저하에 의한 영역을 고려한 피해영역을 산정하였다.

상수관망의 부분적인 차폐로 인하여 발생하는 수리학적 조건을 고려하기 위해서는 차폐된 상수관들을 고려한 수리학적 모의가 필요하며, 본 연구에서는 미국 환경청에서 개발한 수리모형인 EPANET을 사용하여 수리학적 조건의 변화를 모의하였다. Segment와 비의도적 구역고립을 산정하는 알고리즘을 Visual Basic으로 구현한 후, EPANET ToolKit를 Visual Basic 프로

그램의 서브루틴으로 사용, 산정된 segment와 비의도적 구역고립내의 상수관을 EPANET 입력화일에서 직접 제어하여 부분적 차폐가 야기한 새로운 수리학적 조건을 모의하였다. 부분적 차폐가 이루어진 상수관망의 수리모델링에서 중요한 것은 차폐된 부분을 반영하는 것으로 차폐는 밸브를 단음으로 해서 이루어진다. EPANET으로는 제수밸브 모의가 불가능하므로 상수관을 정의하는 인자(parameter) 중에서 관 상태(status)를 나타내는 인자로 제수밸브 모의를 수행하였다.

EPANET에서 모의 가능한 관의 상태는 다음과 같은 세 가지로 정의할 수 있다.

- ① OPEN: 관이 정상적인 통수능을 가지는 경우
- ② CLOSE: 관이 닫혀 있어서 물의 흐름이 발생하지 않는 경우
- ③ CV: 관 중간에 물 흐름의 방향을 조절하는 Flow control 밸브가 설치되어 지정된 방향으로 만 물의 흐름이 나타나는 경우

정상적인 조건에서 관의 상태는 "OPEN"으로 지정되거나 차폐된 관은 "CLOSE"로 지정을 하게 되면 그 관에는 물의 흐름이 나타나지 않게 모의된다. 따라서 segment에 포함되거나 비의도적 구역고립에 포함된 관들의 상태를 "CLOSE"로 조정하여 새로운 수리학적 조건을 모의하였다.

## 2.5 발생 가능한 피해 영역들의 조합

본 연구에서는 상수관의 파괴에 의해 발생 가능한 피해 영역을 네 가지 기준에 의해 정의하였다. 이 중 파괴된 관(기준 1)과 segment(기준 2)는 직접적인 피해 영역이므로 언제나 발생하지만, 비의도적 구역고립(기준 3)과 수리학적인 피해 영역(기준 4)은 늘 발생하는 것이 아니다. 따라서 상수관 파괴에 의한 피해 영역은 이들 기준의 발생 가능성에 따라 다음과 같은 4가지 조합으로 구분할 수 있다.

- ① 조합 1 : segment 발생 영역
- ② 조합 2 : segment 발생 및 수리학적 압력저하 영역
- ③ 조합 3 : segment 및 비의도적 구역고립 영역
- ④ 조합 4 : segment, 비의도적 구역고립 및 압력저하 영역

Fig. 5는 이와 같은 발생 가능한 조합을 결정하는 과정을 나타내고 있다. Fig. 5를 간략하게 설명하면 상수관의 파괴가 발생하면 파괴된 관이 야기하는 segment를 산정하며 해당 segment에 의한 비의도적 구역고립

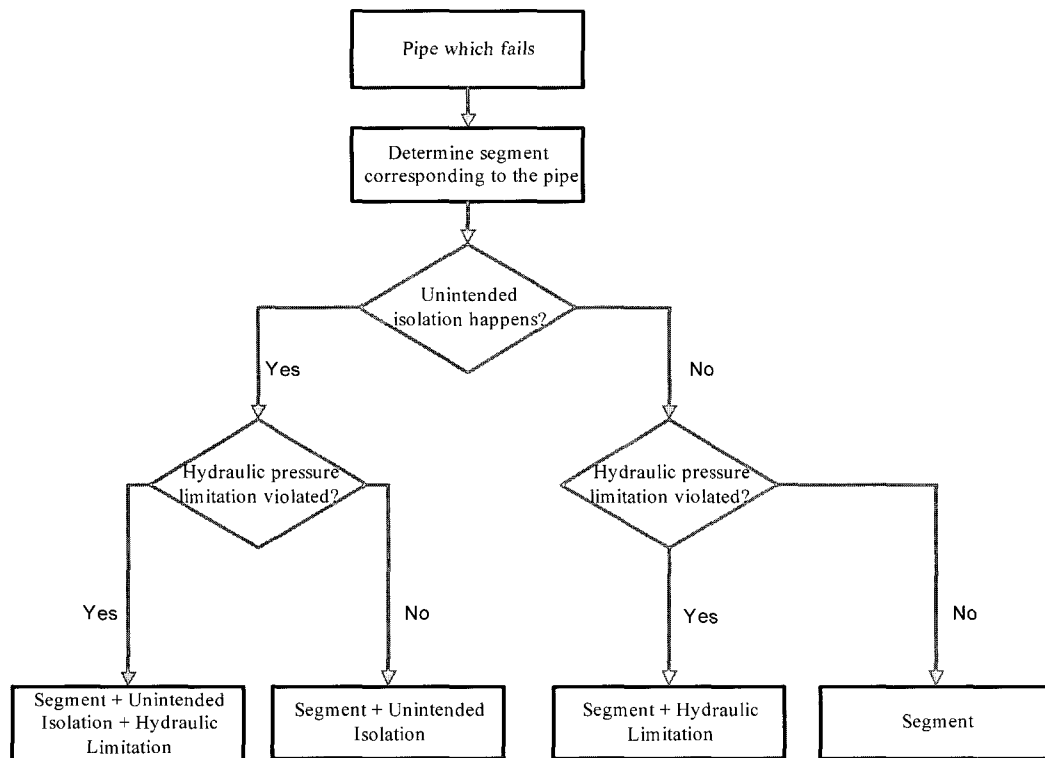


Fig. 5. The four combinations to estimate pipe failure impacts

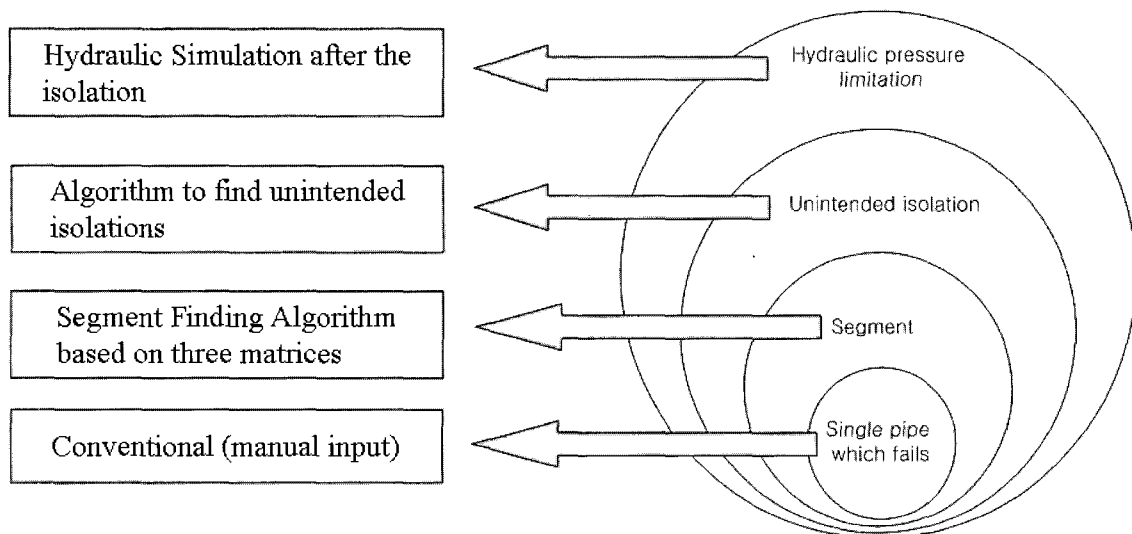


Fig. 6 Accumulation of pipe failure impacts and methodologies to define them

을 산정한다. 비의도적 구역고립의 유무에 따라서 두가지 경우로 구분되며 각 경우마다 압력저하 영역의 유무를 확인한다. 이러한 과정으로 네 가지 피해영역 조합을 산정한다. 또한, Fig. 6은 네 가지 조합을 결정하기 위해서 사용되는 방법을 나타내고 있다. 즉, Segment를 산정하는 알고리즘, 비의도적 구역고립을 탐색하기 위한 수정된 Breadth-First search 알고리즘, 그리고 압력저하 영역 산정을 위한 수리모형 검증 과정이다.

### 3. 실제 상수관망에의 적용

제안된 기법의 적용성을 검토하기 위해 미국 코네티컷주에 위치한 Cherry Hill 상수관망을 선정하여 제안된 기법을 적용하였다. 대상관망은 Fig. 7에 나타난 것과 같이 90개의 노드와 104개의 관, 94개의 밸브 그리고 2개의 수원 (노드 7에 위치한 펌프와 노드 117 근처에 위치한 탱크)으로 구성되어 있으며 관경의 분포는 12, 8, 6인치 관으로 구성되어 있고 총연장은 68,192ft

(20,784m)이다. 각 노드 및 관별 소비자의 수는 자료의 부족으로 각 노드에서 주어진 용수량 (base demand)에 1인당 일물사용량 (capita per daily water consumption)인 50 gallon per day를 사용하여 구하였다. 하지만 실제 상수관망의 경우 수용가 조사 결과가 있을 것이며, 이를 이용한다면 보다 정확한 소비자의 수를 파악할 수 있을 것이다. 만약 특정 관에 병원이나 학교 등 공공시설물이 연결되어 있는 경우 이를 환산하여 (equivalent customers) 사용할 수 있을 것이다.

피해영역 산정을 위해 요구되는 자료는 EPANET 입

력 파일과 밸브의 위치자료(shape 파일, 도면이나 캐드 파일)이며, 압력수두 저하로 인한 수리학적 피해 영역을 구하기 위한 압력수두 범위는 25psi~125psi를 적용하였다. 해당 압력수두의 범위는 대상 관망이 위치한 코네티컷 주의 압력수두 권장 규약을 따라서 결정 되었다. 분석 결과 104개로 구성된 대상관망은 밸브가 1개 또는 전혀 없는 관이 존재하여 71개의 segment가 발생하였으며 만약 모든 관에 두 개의 밸브가 설치되어 있으면 104개의 segment가 발생할 것이다. Table 2는 포함된 상수관의 수에 따른 대상관망의 segment 분포를 나타내고 있다.

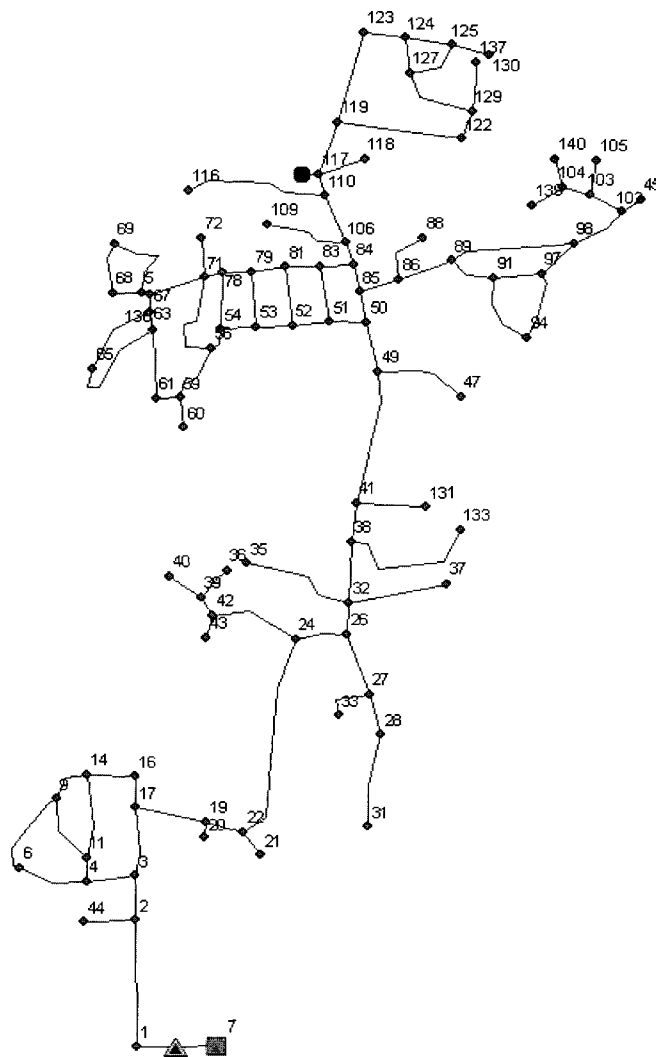


Fig. 7. Cherry Hill water distribution network

Table 2. Frequency of segments depending on the number of pipes in a segment

상수관의 수	빈도	비율
1	52	73%
2	13	18%
3	3	4%
4	1	1%
5 이상	2	3%
Total	71	100%



Table 3. Examples of pipe failure impacts considering the failure combinations 1, 2 and 3

No.	Segment 번호	기준 2 (segment)		기준 3 (비의도적 구역고립)		전체 피해영역 사용자수 (조합 3)
		pipes	피해영역 사용자수(명)	pipes	피해영역 사용자수(명)	
1	S17	84, 87, 90, 91, 92, 93, 116,	336 (3.6%)	55, 56, 57, 58, 64, 65, 67, 71, 72, 73, 75, 76, 83, 94, 97, 101, 107, 113, 114, 115, 145, 146, 156, 160, 161, 123, 124, 125, 130, 131, 132, 136, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 36, 4,	3222 (34.5%)	3558 (38.1%)
2	S18	94, 97,	118 (1.3%)	101, 107, 113, 114, 115, 160, 161, 123, 124, 125, 130, 131, 132, 136,	1091 (11.6%)	1209 (12.9%)
3	S20	107, 136,	161 (1.7%)	113, 114, 115, 160, 161, 132,	291 (3.1%)	452 (4.8%)
4	S23	120, 127,	122 (1.3%)	128, 129, 133, 134, 135, 138, 139, 141, 143, 159, 48, 49, 50, 122,	1518 (16.3%)	1640 (17.6%)
5	S25	129, 133,	249 (2.7%)	134, 135, 138, 139, 141, 143, 159, 48, 49,	840 (9.0%)	1089 (11.7%)

전체 71개의 segment 분석결과 이중 17개의 segment는 비의도적 구역고립을 발생시켰다. 비의도적 구역고립까지 고려한 segment 분석결과 압력수두 저하에 의한 수리학적 손실을 발생 시키는 segment는 없는 것으로 분석되었으나 11개의 segment는 차폐하는 경우 최소한 한 개 이상의 용수지점에 압력수두의 최고치인 125psi 이상의 압력 상승을 발생시켰다. 이들 11개의 segment는 저수지와 연결된 펌프 주위에 분포하는 segment로 이들 segment를 차폐하는 경우 용수수요량은 저하되고 손실수두가 감소하여 나타나는 현상으로 판단된다. 파괴된 상수관을 수리하는 동안에 나타나는 현상이기는 하지만 이러한 과도한 압력수두는 설치된 관에 추가적인 내부하중을 가하게 되어 추가적인 관파괴를 야기할 수 있으므로 펌프의 양정고를 조절하는 등의 운영으로 과도한 압력증가를 막아야 할 것으로 판단된다.

압력수두 저하로 인한 피해영역이 없으므로 압력저하영역을 포함하는 조합 2와 조합 4에 의한 피해영역은 대상관망에 발생하지 않으며, 조합 1과 조합 3에 의한 대상관망의 피해영역을 산정해 보았다. 조합 3에 의한 피해영역 사용자분석 결과 최대 피해영역사용자를 발생시키는 상위 5개의 segment를 Table 3에 나타내었다.

기존의 피해영역 산정에서는 파괴된 상수관만을 고려 (Jowitt and Xu (1993) and Su et al. (1987)) 하였으며 이러한 방법과 제안된 방법에 의한 피해영역 산정의 차이는 segment와 비의도적 구역고립에 포함된 상수관의 수로 나타낼 수 있다. 예를 들어 segment S17의 경우 {84, 87, 90, 91, 92, 93, 116} 상수관 중에서 어느 한 개가 파괴될 경우 총 48개 (segment에서 7개, 비의도적 구역고립에서 41개)의 상수관이 피해를 입게 된다. 만약 기존의 피해영역 산정 기법에 의한다면 단지 파괴된

상수관 1개만 피해영역으로 산정되기 때문에 실제 나타나는 피해영역과의 차이는 크다고 할 수 있다. 따라서 실제 상수관망에서 상수관 파괴에 의한 피해 영역의 산정시 제안된 방법을 사용하여 산정하는 것이 정확한 결과를 나타낼 수 있다.

7개의 상수관(84, 87, 90, 91, 92, 93, 116)으로 구성된 S17의 경우, segment에 포함된 하나의 관이라도 파괴되는 경우 41개의 관이비의도적 구역고립 영역에 포함되어 가장 큰 피해 영역을 나타내는 segment임이 밝혀졌다. 전체 관의 약 45%에 해당하는 관이 S17에 연관되어 있으며 총 3,558명의 수요자가 영향을 받게 된다. 이는 총 수요자 9,339명의 약 38%에 해당한다. 따라서 이렇게 많은 영향을 미칠 수 있는 segment내의 관들을 효과적으로 관리하여 관파괴 확률을 줄이는 운영관리가 필요하며 제안된 방법이 효율적인 운영관리 수립에 사용될 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

상수관 파괴에 의한 피해 영역의 산정을 위한 기존의 연구는 주로 파괴된 관과 이를 바탕으로 한 수리학적 모의에 의해 압력수두가 저하되는 용수지점을 포함하는 방법으로 사용하였다. 그러나 이러한 방법은 실제 상수관 파괴시 밸브를 사용한 차폐를 고려하지 않았으며 상수관의 추가적 차폐로 인한 상수관망의 segment와 하류부 용수공급노선 단절에 의한 용수중단 영역인 비의도적 구역고립을 고려하지 못하였다. 이와 같은 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 차단밸브의 수와 위치를 고려하여 실제적인 상수관 피해영역 산정기준을 제시하였으며 이는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 파괴된 관 뿐 아니라 상수관의 추가적 차폐로 인

- 한 segment와 비의도적 구역고립을 고려하는 방법을 제안하였다.
- 2) 수리화학적 피해 영역인 압력수두가 저하되는 용수 지점을 구하기 위한 수리모델링에 단순히 파괴된 관뿐 아니라 segment와 비의도적 구역고립에 포함된 관들을 반영하여 관 파괴 시 변화된 상수관망의 수리학적 모의를 현실에 가깝게 하여 구하였다.
  - 3) 체계적인 상수관 파괴 영역을 정의하였으며 (Figs. 5 and 6 참조) 각 파괴영역을 산정할 수 있는 방법을 제안하였다.
  - 4) 실제 지역인 Cherry Hill 상수관망을 분석하여 제안된 방법의 적용성을 검증하였으며, 적용결과 특정 상수관이 파괴되면 많은 피해를 야기시킬 수 있는 segment를 구할 수 있었으며 이러한 segment를 집중 관리하여 관파괴가 일어나지 않도록 하는 효율적인 유지관리 계획 수립이 가능한 방법을 제시하였다. 따라서 본 연구에서 제시된 기법을 설계시 부터 적용하면 관망의 지속적인 유지관리에 매우 유용할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구 논문은 미국 AWWARF의 AWWARF 2869 프로젝트의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

환경부 (2001), 상수도 시설기준, 환경부.

Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., and Orlin, J. B. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithm, and Applications*, ISBN 0-13-617549-X, Prentice Hall, Inc., New Jersey

Bao, Y. and Mays, L.W. (1990). "Model for Water Distribution System Reliability", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 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. and Coals (1986). A., "Quantitative Approaches to Reliability Assessment in Pipe Networks", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 112, No. 3, pp. 287- 301.

Fujiwara, O. and Tung, H. D., (1991). "Reliability Improvement for Water Distribution Networks Through Increasing Pipe Size", *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 7, pp 1395-1402.

Jowitt, P.W. and Xu, C (1993). "Predicting Pipe Failure Effects in Water Distribution Networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, No. 1, pp. 18-31

Jun, H., Loganathan, G. V., Deb, A. K., Grayman, W. and Snyder, J. (2005). "A segment algorithm for isolating a subsystems in a water distribution network", *International Conference on Efficient Use and Management of Urban Water Supply*, Santiago, Chile, IWA.

Jun, H. (2005). "Strategic valve loations in a water distribution system", Ph. Doc. Thesis, Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Khomsi, D., Walters, G.A., Thorley, R.D., and Ouazar, D. (1990). "Reliability Tester for Water Distribution Networks." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 10(1), pp 10-19.

Mays, L. W. (1996), "Review of Reliability Analysis of Water Distribution Systems", *International Symposium On Stochastic Hydraulics '96, Proceeding of The Seventh IAHR International Symposium*.

Moulton Niguel Water District (1997), "500.6 Water Valve Spacing", Section 500, Design Criteria, Domestic Water Supply, p. 2.

Rossman, L. A., (2000). "EPANET users manual", U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.

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*, Vol. 114, No. 12, pp. 1539-1556.

Yang, Shu-Li., Hsu, Nien-Shen, Louie, P. W. F., and Yeh, W. W-G. (1996). "Water Distribution Network Reliability: Connectivity Analysis", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 54-64.

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.

Walski, T.M. et al (2001), *Water Distribution Modeling*, Haestad Method, Waterbury, CT

Willington Town, Connecticut (2001), Appendix 3 - Community Water Supply, *Public Documents*.

(논문번호:05-90/접수:2005.07.06/심사완료:2005.11.08)