

상수관망의 신뢰도 산정을 위한 Segment 기반의 Minimum Cutset 방법

A Segment-based Minimum Cutset Method for Estimating the Reliability of Water Distribution Systems

전 환 돈* / 박 재 일** / 백 천 우*** / 김 중 훈****

Jun, Hwan Don / Park, Jae Il / Baek, Chun Woo / Kim, Joong Hoon

Abstract

In this study, a methodology which is based on segments and minimum cutsets to estimate the reliability of a real water distribution system efficiently and accurately is suggested. The current reliability assessment models based on minimum cutset consider a pipe as only area impacted by a pipe failure which incurs underestimation of pipe failure impact. In contrary, the suggested methodology adopts "segment" and "unintended isolation" with the hydraulic pressure failure area to define the actual service interruption area in a water distribution system due to a pipe failure, which is different from the previous reliability estimating methodologies. In addition, a minimum cutset is defined as a single segment incurring abnormal operating conditions and the success mode approach is used to account for the probability of multiple failure combinations of minimum cutsets. The model considers numbers and locations of on-off valves when the service interruption area is defined. Once the methodology is applied to a real water distribution system, it is possible to define actual service interruption areas and using the defined areas, the reliability of the water distribution system is estimated reliably, compared with the previous reliability assessment methodologies.

keywords : Water Network, Reliability Assessment Model, Segment, Minimum Cutset, Success Mode Approach

요 지

본 연구에서는 실제 대형 상수관망에서 보다 효율적이면서도 정확한 신뢰도를 추정할 수 있는 segment를 기반으로 한 minimum cutset 방법을 제안하였다. 기존의 상수관망에서 minimum cutset을 기반으로 한 모형은 상수관을 minimum cutset의 최소단위로 다루어 상수관 파괴에 따른 피해영역을 과소산정할 수 있는 문제점을 가지고 있다. 그러나 제안된 신뢰도 추정 모형은 기존 신뢰도 추정 모형과 달리, 상수관 파괴에 따른 피해영역을 현실적으로 추정하기 위하여 segment와 unintended isolation, 그리고 수리학적 피해인 압력저하영역을 도입하였다. 또한 minimum

* 한밭대학교 토목공학과 전임강사
Assistant Professor, Hanbat National Univ., Daejeon, Korea
(e-mail: hwjun70@hanbat.ac.kr)

** 고려대학교 부설 방재과학기술연구소 연구원
Researcher, Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

*** 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 박사후과정
Post Doctor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

**** 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 교수
Professor, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

cutset 방법에서 정의될 수 있는 minimum cutset을 상수관망 내 일부 절점의 비정상 상태를 야기하는 segment 1개로 정의하였으며 정의된 minimum cutset의 동시파괴조합의 확률을 고려하기 위하여 success mode approach를 적용하였다. 제안된 모형은 제수밸브의 위치와 수를 고려하여 상수관 파괴에 따른 피해영역을 추정하며, 실제 대형 상수관망인 Chester Water Authority에 적용한 결과, 기존 신뢰도 추정 모형과 비교할 때 보다 실제적인 피해영역의 추정과 이에 따른 신뢰도의 추정이 가능하였다.

핵심용어 : 상수관망, 신뢰도 모형, Segment, Minimum Cutset, Success Mode Approach

1. 서 론

상수관망은 인간생활과 밀접하게 직결되어 있으며, 최근 산업화, 도시화의 심화로 인한 용수공급의 부족과 수질악화의 심화는 인간복지와 산업발전을 크게 저해하고 있다. 따라서 합리적이고 효율적인 상수관망의 설계 방안과 유지관리방안이 절실히 요구되고 있다. 상수관망의 신뢰도는 상수관망의 상태를 표현하는 중요한 지표로서, 설계뿐만 아니라 적절한 유지관리 계획 수립에 있어서 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 불충분한 자료와 확률 계산의 어려움 등으로 인하여 기존의 신뢰도 추정 모형으로 정확한 상수관망의 신뢰도 추정이 어려운 실정이다. 특히 이러한 문제는 실제 상수관망의 경우 더욱 심해 설계방안과 유지관리 방안을 위한 적절한 의사결정을 어렵게 하고 있다.

상수관망에서 신뢰도는 아직까지 정확히 정의되지 않았으나 일반적으로, 상수관망에 필요한 수량을 적정한 압력(Goulter, 1995; Mays, 1996)으로 소비자에게 용수를 공급할 수 있는 능력으로 정의할 수 있다. 이를 수학적으로 표현하면, 기준기간(n 년) 동안 소비자에게 기준조건(수량과 압력)을 만족시키며 용수를 공급할 수 있는 성공확률을 의미한다. 수질 역시 중요한 상수관망의 신뢰도 결정에 영향을 미치는 인자이나 상수관망의 수리학적 거동을 중심으로 신뢰도를 정의할 때 수질에 의한 신뢰도는 접근방법이 다르기 때문에 본 연구에서는 수압과 유량으로 신뢰도 정의를 한정한다. 상수관망의 수리학적 신뢰도는 상수관, 탱크, 펌프, 밸브와 같은 구성요소의 신뢰도(components reliability)와 구성요소의 신뢰도로부터 결정이 되는 절점 신뢰도(node reliability), 상수관망 신뢰도(system reliability)로 구분되며, 구성요소의 신뢰도는 자료의 통계를 바탕으로 한 통계적 확률로, 절점 신뢰도와 상수관망 신뢰도는 구성요소의 통계적 확률을 바탕으로 한 수학적 확률로 추정될 수 있다.

기존의 신뢰도 추정모형의 단점은 크게 상수관 파괴로 인한 피해영역 산정의 오류와 신뢰도추정 방법의 접

근론적 오류로 구분할 수 있다. 피해영역 산정의 오류는 Su et al.(1987), Cullinane et al.(1989), Goulter (1995), Mays(1996) 등의 접근 방법에서와 같이 구성요소의 파괴 상태에 의한 피해영역을 파괴된 상수관만을 대상으로 추정함으로써 발생하는 오류로 대표된다. 기존의 피해영역 추정방법은 파괴된 상수관이 차폐되었을 경우에만 논리가 성립될 수 있으나 상수관 차폐에 이용되는 제수밸브의 위치와 수에 따라 추가로 인근의 상수관이 차폐되고 있는 것이 현실이며, 실제 피해영역은 더 큰 경우가 대부분이다. 즉 실제 발생 가능한 피해영역보다 과소 추정하는 단점이 있으며, 이 경우 절점과 상수관망의 상태가 비정상 상태임에도 불구하고 정상 상태로 간주하기 때문에, 절점과 상수관망이 정상 상태일 때의 확률인 절점 신뢰도, 상수관망 신뢰도는 과대 추정하게 된다. 이와 같은 문제점은 Walski (1993)가 제안한 segment의 개념을 이용한 실질적인 피해영역 산정으로 해결할 수 있다. Segment는 상수관이 파괴된 경우 파괴된 상수관을 격리시키기 위해서 제수밸브를 닫게 될 때 함께 격리되는 상수관과 절점의 집합으로 정의되며 Walski(1993)에 의해 처음으로 제안되었다. 또한 전환돈(2005)과 전환돈과 김중훈(2006)은 실제 상수관망에서 segment를 효율적으로 정의하기 위해 matrix를 기반으로 한 기법을 제안하였으며, 관망의 구조에 의해 결정되는 비의도적 구역고립에 의한 피해영역과 수압저하에 따른 피해영역을 정의하는 방법론을 제시하였다.

신뢰도추정 방법의 접근론적 오류는 상수관의 동시 파괴확률의 무시에서 발생하는 오류로 대표된다. Jamil and Ahmad(1985), Schabe(1995), Mays(2004)는 신뢰도 추정을 위해 개발된 여러 모형 중, minimum cutset method를 다른 모형에 비하여 비교적 정확하면서도 프로그래밍이 용이하여 효율적인 신뢰도 추정이 가능한 모형으로 평가하였다. Billinton and Allan(1983), Ross(1985), Su et al.(1987) 등은 상수관망의 신뢰도를 추정하기 위하여 minimum cutset method를 적용하면서 minimum cutset의 정의를 위하여 비정상상태접근방

법(failure mode approach)로 신뢰도를 추정하였다. 그러나 다양한 minimum cutset의 파괴조합에 따른 계산량을 감소시키기 위하여 minimum cutset의 동시 파괴 확률을 무시함으로써 신뢰도 오차를 증가시켰다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Mays(2004)는 minimum cutset method를 정상상태접근방법(success mode approach)로 신뢰도를 추정함으로써 신뢰도 계산상의 오차를 감소시켰다. 본 연구에서도 그가 제안한 정상상태접근방법을 도입하여 대형 상수관망의 신뢰도 계산의 정확도를 높였다. 그러나 그의 논문에서 minimum cutset의 최소단위를 상수관으로 정의하여 제수밸브에 의해 많은 상수관이 함께 차폐되는 가능성을 고려하지 않았다.

이와 같은 기존의 신뢰도 추정모형의 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 실제 대형 상수관망에서 보다 효율적이면서도 정확한 신뢰도를 추정할 수 있는 segment를 기반으로 한 minimum cutset 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 segment, 비의도적 구역고립 및 수압저하 영역을 고려하여 산정된 정확한 피해영역을 바탕으로 minimum cutset을 정의하고, 신뢰도의 계산상 오차를 최소화할 수 있는 정상상태접근방법과 정의된 minimum cutset를 이용하여 신뢰도를 추정한다. 제시된 방법과 기존의 방법을 이용해 추정된 실제 상수관망의 신뢰도를 비교하여 개발된 방법의 적용성을 검토하였다.

2. 모델 구축을 위한 기본 이론

2.1 상수관 파괴에 따른 피해영역

전환돈(2005)과 전환돈과 김중훈(2006)은 한 개의 상수관이 파괴된 경우의 피해영역을 ① segment, ② 비의도적 구역고립 및 ③ 압력저하지점의 세 가지로 구분하여 산정하였다. Segment는 직접적인 단수영역에 해당하며, 관의 파괴 시 파괴된 관과 함께 밸브에 의해서 차폐되는 주변관의 집합으로 정의할 수 있다. 파괴된 관이 두개의 밸브를 양끝에 가지고 있는 경우 이 관은 하나의 segment로 정의할 수 있으며, 한 관을 격리시키기 위해 그 관에 인접한 관들도 함께 격리해야할 경우 함께 격리되는 관들을 하나의 segment로 정의할 수 있다. 상수관 파괴 시 복구를 위하여 파괴된 관을 포함한 segment를 차폐할 경우, segment가 격리되었기 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 용수공

급 노선(path)에 단절이 발생한다. 이러한 영역을 비의도적 구역고립 (unintended isolation)으로 정의한다. 마지막으로 segment와 비의도적 구역고립에 의해 관망의 수리조건이 변하여 필요한 압력이 보장되지 않는 지점은 용수가 공급된다 하여도 용수의 사용성이 저하되어 간접적인 단수로 생각될 수 있으며 상수관 파괴에 의한 피해영역에 포함된다.

2.2 Segment 기반의 Minimum cutset 정의

Su et al.(1987)와 Mays(2004) 등은 cutset을 '상수관망에서 일부 절점의 비정상 상태를 야기하는 구성요소의 집합'으로 정의하였다. 즉, 정의되는 cutset 중 1개 이상이 파괴 상태이면, 상수관망에서 최소 1개 이상의 절점은 비정상 상태가 된다. 본 연구에서는 구성요소를 상수관으로 한정시켰으므로 cutset은 상수관의 동시 파괴 상태를 포함한 집합으로 정의될 수 있다. 그러나 상수관망에서 발생 가능한 모든 cutset을 정의하는 것은 event tree method에서 event tree를 정의하는 것만큼 복잡하고 상당한 계산량이 요구된다. 따라서 정의될 수 있는 cutset 중 최소한의 구성요소(상수관)를 가진 cutset을 minimum cutset으로 정의한다. 상수관망에서 minimum cutset의 정의는 상수관 파괴에 따른 segment를 기준으로 하며 이는 상수관망의 파괴에 따른 피해영역을 실제적이며 정확히 산정하기 위해서이다.

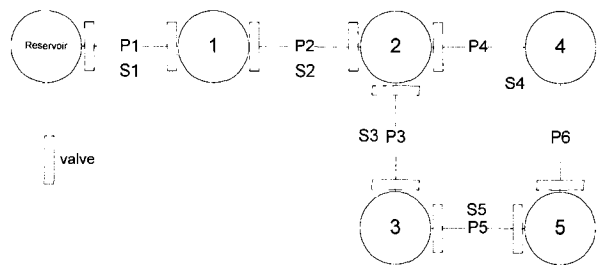


Fig. 1. Sample Network

Fig. 1은 한 개의 수원과 5개의 절점, 6개의 상수관으로 구성된 상수관망을 나타내며, 대상 관망에 대한 minimum cutset의 정의는 다음과 같다. 정의되는 segment는 총 5개이며, segment S4의 경우 파이프 하나로 구성되는 다른 segment와 달리 두 개의 파이프(P4와 P6)로 이루어져 있다. Segment와 비의도적 구역고립 이외에 압력저하로 인한 피해영역 산정을 위해 P3가 파괴된 경우 3번 절점의 수압이 기준 수압이하로 저하된다고 가정하고 minimum cutset을 정의하였으며, Table 1은 각 segment의 격리에 따른 피해 영역(절점)을 나타내고 있다.

Table 1. Criteria to Define Minimum Cutsets in the Sample Network

Segment	Pipes in segment	Unintended Isolation	Hydraulic Failure	minimum cutset?
S1	P1	1, 2, 3, 4, 5	없음	Yes
S2	P2	2, 3, 4, 5	없음	Yes
S3	P3	N/A	3	Yes
S4	P4, P6	4	N/A	Yes
S5	P5	N/A	N/A	No

6개의 상수관중 파괴시 절점의 단수 또는 수압저하를 유발하는 상수관은 P1, P2, P3, P4이며 이들 네 개관은 sample network의 minimum cutset으로 정의할 수 있다. 여기서 중요한 점은 segment S4에 포함되는 P4 또는 P6의 파괴 시에는 인접한 제수밸브를 닫아야 하며, 이 경우 절점 4가 함께 고립되기 때문에 (segment내에 포함) S4 경우 minimum cutset으로 정의된다.

2.3 Minmum cutset 방법을 이용한 상수관망의 신뢰도 산정식

Minimum cutset을 정의할 때 minimum cutset이 파괴되면 최소한 1개의 절점에서 용수공급이 중단되기 때문에 상수관망 전체가 비정상 상태가 된다. 따라서 상수관망이 정상상태인 경우는 minimum cutset이 1개라도 파괴되는 사건(event)이 일어나지 않아야 하며 이때 상수관망이 정상상태일 확률은 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$R_{sys} = 1 - P\{FE(MC_1) \cup FE(MC_2) \cup \dots \cup FE(MC_n)\} \quad (1)$$

여기서, R_{sys} 는 상수관망이 정상상태일 확률, $FE(MC_i)$ 는 i 번째 minimum cutset의 파괴사건(failure event)이

며 P 는 모든 minimum cutset의 파괴사건의 합집합의 확률이다. 이는 다음 Fig. 1 및 Fig. 2와 같은 벤다이어그램으로 표현될 수 있다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 각 minimum cutset의 파괴사건 발생확률은 원으로 표현되었으며, 각 사건이 동시에 발생할 확률은 중첩으로 표현되었으며 모든 원의 전체면적은 모든 minimum cutset의 파괴사건의 합집합의 확률이다. 원 바깥의 면적은 상수관망이 정상상태일 확률을 의미한다. 모든 minimum cutset의 파괴사건의 합집합의 확률을 구하기 위하여 Boolean 대수법칙을 적용하면 합집합의 확률은 다음 Eq. (2)로 산정 할 수 있다.

$$P\{A \cup B \cup C \dots\} = p_1 - p_2 + p_3 - \dots + (-1)^{k+1} \times p_k \quad (2)$$

여기서, $p_1 = P\{A\} + P\{B\} + P\{C\}$
 $p_2 = P\{A \cap B\} + P\{B \cap C\} + P\{C \cap A\}$
 $p_3 = P\{A \cap B \cap C\}$

Eq. (2)는 동시파괴를 고려한 한 경우(Fig. 2)에 해당하며, 만약 각 사건이 동시에 일어날 수 없는 배반사건(Fig. 3)일 경우 합집합의 확률은 다음 Eq. (3)으로 산정된다.

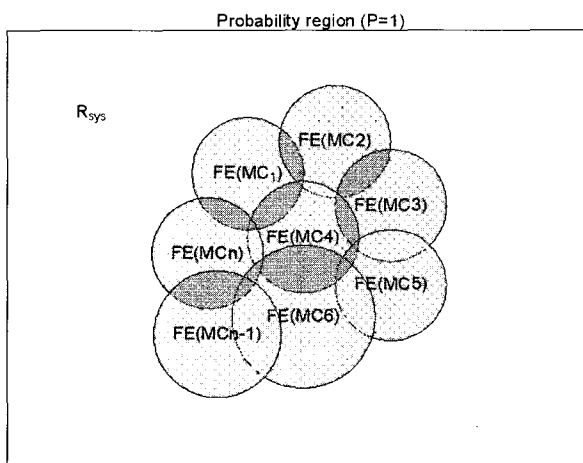


Fig. 2. The Probability of Union of MCs with Consideration of Multiple Failures of MCs

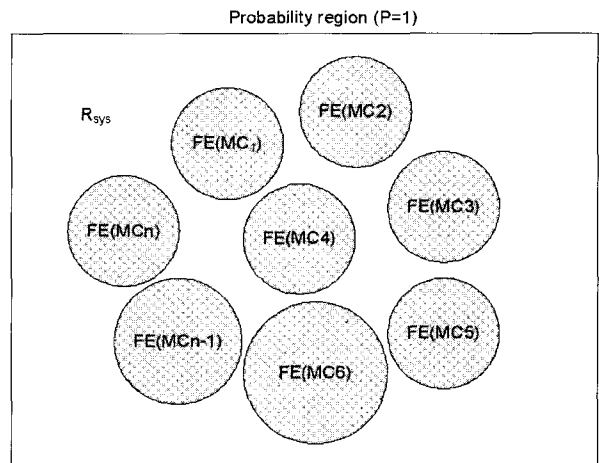


Fig. 3. The Probability of Union of MCs with Consideration of Multiple Failures of MCs

$$P\{A \cup B \cup C \cup \dots\} = P\{A\} + P\{B\} + P\{C\} + \dots \quad (3)$$

Eq. (2) and (3)을 minimum cutset 간의 파괴사건발생에 적용하면 minimum cutset 간에 동시파괴를 고려하는 경우 (CASE 1)와 그렇지 않은 경우 (CASE 2)로 나누어 상수관망의 신뢰도를 산정할 수 있다. 즉 CASE 1의 경우 Eq. (2)를 이용하여 계산된 모든 minimum cutset의 파괴사건에 대한 합집합의 확률로 산정되며, CASE 2의 경우 Eq. (3)으로 계산된 모든 minimum cutset의 파괴사건의 합집합의 확률로 산정된다.

일반적으로 상수관의 동시파괴의 발생가능성은 매우 낮기 때문에 CASE 2가 많은 연구(Su et al, 1987; Mays 1996)에서 적용되었으나, 실제 상수관망의 경우 많은 minimum cutset이 존재하고 이에 따라 minimum cutset 간의 동시파괴사건 조합의 수가 커지게 되어 결과적으로 Eq. (2)의 p_2 와 p_3 과 같은 사건의 동시발생 확률 값이 커지게 된다.

Su et al. (1987)의 연구에서 적용한 상수관망은 관거의 수가 18개에 불과하여 minimum cutset 간의 동시파괴사건 조합의 수가 적어서 Eq. (2)의 p_2 와 p_3 를 무시할 수 있었고 계산된 상수관망의 신뢰도 값의 오차가 적었으나 실제 상수관망에 Eq. (3)을 적용할 경우 사건의 동시발생 확률 값을 무시할 수 없기 때문에 신뢰도의 오차 값이 커지게 된다. 예를 들어 100개의 minimum cutset이 존재하는 상수관망의 경우 minimum cutset 간 상호동시파괴 조합의 수는 Table 2와 같이 산정할 수 있다.

Table 2에서와 같이 단지 100개의 minimum cutset

을 가지는 상수관망의 경우에도 minimum cutset 간의 동시파괴 조합의 수는 매우 크며 실제 상수관망의 경우 조합의 수는 이보다 더 기하급수적으로 커질 것이다. 즉 개개 조합의 발생확률은 지극히 작다 하더라도 조합의 수가 매우 커질 경우 조합의 모든 발생확률을 모두 더한 값은 상수관망의 신뢰도 계산에서 무시할 수 없는 값이 될 것이며, 실제 상수관망에 minimum cutset 방법으로 상수관망의 신뢰도를 구할 경우 CASE 1이 적용되어야 할 것이다. 그러나 CASE 1에 Eq. (2)를 적용하여 상수관망의 신뢰도를 구할 경우 minimum cutset 간의 모든 동시파괴조합을 구해야 하며 이는 앞의 예에서 나타난 것과 같이 거의 불가능하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 정상상태접근방법(success mode approach)를 이용하여 상수관망의 신뢰도를 추정하고자 한다. Eq. (1)에서 P 는 모든 minimum cutset의 파괴사건의 합집합의 확률로 정의되었다. 즉, P 는 minimum cutset의 파괴 (failure)에 기반을 둔 합집합의 확률이므로 이러한 접근 방법을 비정상상태접근방법(failure mode approach)라고 한다. 이에 반해서 정상상태접근방법은 각 minimum cutset이 안정적으로 운영될 경우를 고려한다. 즉 개개의 minimum cutset이 모두 정상적으로 운영이 될 경우 상수관망 전체는 정상상태를 유지할 것이다. 이 때 상수관망의 신뢰도는 다음 Eq. (4)를 이용해 산정할 수 있다.

$$R_{sys} = P\{FE(MC_1)^c \cap FE(MC_2)^c \cap \dots \cap FE(MC_n)^c\} \quad (4)$$

Table 2. Total Number of the Possible Combinations of Multiple Failures of Minimum Cutsets If the Number of MCs is 100

Number of multiple failures of minimum cutsets	Equations	Number of the combinations
1	${}_{100}C_1 = \frac{100!}{1! \times 99!}$	100
2	${}_{100}C_2 = \frac{100!}{2! \times 98!}$	4,950
3	${}_{100}C_3 = \frac{100!}{3! \times 97!}$	161,700
⋮	⋮	⋮
98	${}_{100}C_{98} = \frac{100!}{98! \times 2!}$	161,700
99	${}_{100}C_{99} = \frac{100!}{99! \times 1!}$	100
100	${}_{100}C_{100} = \frac{100!}{100! \times 0!}$	1
Total number of the possible combinations of multiple failures of minimum cutsets		1.26765×10^{30}

여기서, $FE(MC_i)^c$ 는 i 번째 minimum cutset의 파괴사건의 여집합으로 정상운영사건(success event)이다. 사건들 간 교집합의 발생확률은 Boolean 대수법칙에서 각 사건이 독립사건일 경우, 즉 사건 A에 따라 사건 B가 일어날 확률이 변하지 않을 때 다음 Eq. (5)를 이용해 산정할 수 있다.

$$P\{A \cap B \cap C \cap \dots\} = P\{A\} \times P\{B\} \times P\{C\} \times \dots \quad (5)$$

따라서 상수관망의 신뢰도는 다음 Eq. (6)과 같이 구하여 진다.

$$\begin{aligned} R_{sys} &= P\{FE(MC_1)^c \cap FE(MC_2)^c \cap \dots \cap FE(MC_n)^c\} \\ &= P\{FE(MC_1)^c\} \times P\{FE(MC_2)^c\} \times \dots \times P\{FE(MC_n)^c\} \\ &= [1 - P\{FE(MC_1)\}] \times [1 - P\{FE(MC_2)\}] \\ &\quad \times \dots [1 - P\{FE(MC_n)\}] \end{aligned} \quad (6)$$

Eq. (6)은 minimum cutset간의 동시파괴조합의 확률을 고려한 식이며 비정상상태접근방법을 통한 신뢰도계산 보다 계산상의 오차가 없다고 할 수 있다. Eq. (6)의 $P\{FE(MC_i)\}$ 는 segment의 파괴확률이며 segment에 포함되어있는 상수관의 파괴확률이다. Segment가 두 개 이상의 관으로 이루어져 있는 경우 segment의 파괴확률은 다음 Eq. (7)과 같이 각 관을 대상으로 한 정상상태접근 방법으로 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} P\{FE(MC_i)\} &= P(\text{Segment } i) \\ &= 1 - P(SP_{pipe_1}) \times P(SP_{pipe_2}) \\ &\quad \times \dots \times P(SP_{pipe_{n-1}}) \times P(SP_{pipe_n}) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $P(\text{Segment } i)$ 는 i segment의 파괴확률이며 $P(SP_{pipe_k})$ k 번째 상수관의 정상운영확률로 k 번째 상수관의 파괴확률($P(\text{Failure}_k)$)의 여집합($1 - P(\text{Failure}_k)$)과 같다.

3. 실제 상수관망에 적용 및 결과

3.1 대상 상수관망 및 minimum cutset 결정 결과

제안된 신뢰도 산정 방법을 Fig. 4에 나타나 있는 Chester Water Authority(CWA, USA)의 실제 상수관망에 적용하였다. CWA는 저수지 2개, 절점 537개, 상수관 560개, 밸브 354개, 펌프 5개, 탱크 2개 및 314개의 segment로 구성되어 있으며, 각 상수관 직경은 100mm

에서 500mm로 다양하게 분포되어 있고 총 연장은 171,245 ft (52,195 m)이다.

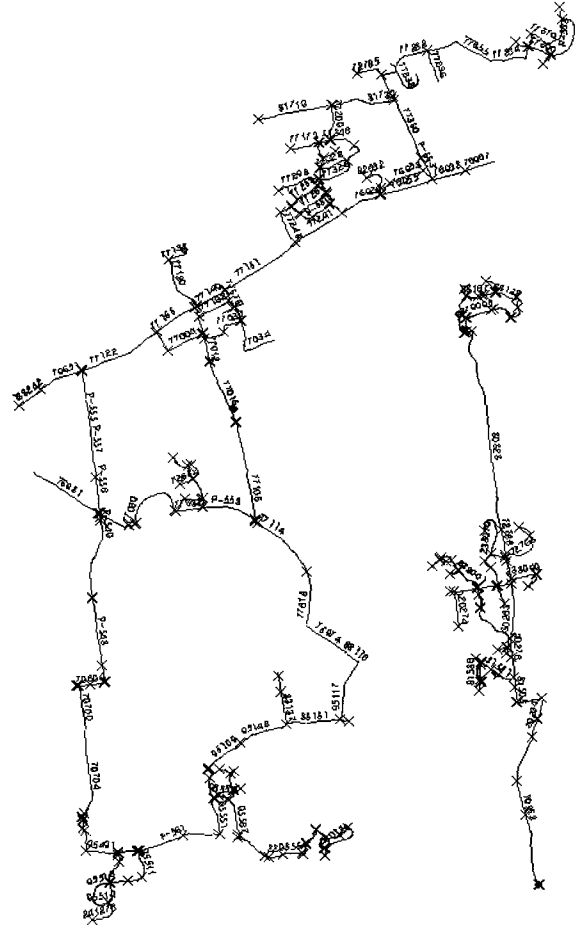


Fig. 4. Water Network in Chester, PA, USA

전환돈(2005), 전환돈과 김중훈(2006)이 제안한 것과 같이 상수관의 파괴로 인한 피해영역을 ① segment, ② 비의도적 구역고립 및 ③ 압력저하지점의 세 가지로 산정하였으며 그 결과를 이용하여 대상관망의 minimum cutset을 정의하였다. 대상 상수관망의 경우 총 314개의 segment를 가지고 있다. 이중 84개의 segment는 상수관을 포함하지 않는 230개 segment 중 120개의 segment가 두 개 이상의 상수관으로 구성되었으며, 230개 segment 중 61개 segment가 비의도적 구역고립을 발생시켰다. 두 개 이상의 상수관으로 구성되어 있고 동시에 비의도적 구역고립을 야기하는 segment는 37개였다. 5개의 segment(S(0), S(56), S(83), S(161), S(196))가 압력저하 영역을 발생시켰으며 이중 S(196)만 한 개의 상수관으로 이루어져 있고 비의도적 구역고립을 발생시키지 않는 segment로 분석되었다. 따라서 해당 상수관의 총 minimum cutset의 수는 다음과 같이 산정되었다.

- 두개 이상의 상수관으로 이루어진 segment = 120 개
- 비의도적 구역고립 발생 segment = + 61 개
- 두 조건 모두에 해당하는 segment = - 37 개
- S(196) = + 1 개
- 총 minimum cutset = 145 개

3.2 상수관 파괴확률

실제 상수관망에서 모든 상수관의 신뢰도는 상수관이 매설된 환경, 온도, 직경, 길이 등에 따라 달라진다. 그러나 기존 상수관망에서 관의 직경과 길이 이외의 변수가 상수관의 신뢰도에 미치는 영향의 예측이 어렵기 때문에 많은 연구에서 직경과 길이로 표현된 파괴함수와 신뢰도 함수를 사용하였다. Su et al.(1987)은 Eq. (8)~(11)으로 표현되는 파괴확률 및 신뢰도 함수를 이용하였으며, Cullinane et al.(1989)은 Eq. (12)와 같이 표현되는 파괴확률, 신뢰도 함수를 이용하였다.

$$\alpha_i = \frac{0.6858}{D_i^{3.26}} + \frac{2.7158}{D_i^{1.3131}} + \frac{2.7685}{D_i^{3.5792}} + 0.042 \quad (8)$$

$$\beta_i = \alpha_i \times L_i \quad (9)$$

$$f_i = 1 - e^{-\beta_i} \quad (10)$$

$$r_i = 1 - f_i \quad (11)$$

$$r_i = (0.92782 \times D_i^{0.000118})^{L_i} \quad (12)$$

여기서, D_i = 상수관 i 의 직경(inches), L_i = 상수관 i 의 길이(miles), f_i = 상수관 i 의 파괴확률, r_i = 상수관 i 의 신뢰도, α = 상수관 i 의 단위길이 별 연간 파괴횟수 (Breaks/mile/year), β = 상수관 i 의 연간 파괴횟수 (Breaks/year)를 의미한다.

본 연구에서는 제안된 상수관망의 신뢰성 산정 방법과 Su et al.(1987)이 제안한 신뢰성 산정방법에 의한 결과를 비교하기 위하여 Eq. (8)~(12)와 같이 표현되는 동일한 파괴함수와 신뢰도 함수를 사용하여 각 관의 파괴확률을 산정하였다. 즉, Eq. (8)~(12)를 사용하여 정의된 각각 minimum cutset의 파괴확률을 계산하고

이를 바탕으로 정상상태확률을 산정한다. 최종적인 상수관망의 신뢰도는 Eq. (6)을 이용하여 산정한다. Table 3은 본 연구에서 제안한 방법을 이용한 신뢰도 산정결과와 비정상상태접근방법을 이용한 Su et al. (1987)의 Eq. (3)을 적용한 신뢰도 산정결과를 비교해 나타내고 있다.

상수관망의 신뢰도이므로 반드시 0에서 1사이의 값으로 나타나야 하지만 Eq. (1)을 적용하여 계산된 비정상상태접근방법의 결과는 Table 3에 나타난 것과 같이 -6.08139로 산정되었다. 이러한 결과를 야기한 이유는 Eq. (1)에서 $P\{FE(MC_1) \cup FE(MC_2) \cup \dots \cup FE(MC_n)\}$ 의 계산치가 7.018139 또는 5.09021로 산정되었기 때문이며 이는 각각 minimum cutset의 파괴확률을 단순히 합하며, minimum cutset 상호간의 동시파괴확률을 고려하지 않았기 때문이다. 이러한 문제점은 제안된 방법을 Cherry Hill 상수관망(전환돈, 2005)에 적용하여 비정상상태접근방법으로 계산한 경우 상수관망의 신뢰도가 -0.95540(Su et al. 식 적용시)와 -0.75789(Cullinane et al. 식 적용시)로 산정되어 CWA와 비슷한 결과를 도출되었다. 이때 신뢰도의 크기가 CWA보다 큰 이유는 Cherry Hill의 경우 약 94개의 관으로 이루어진 작은 관망이어서 MC의 갯수가 더 적고 이에 따라 MC의 동시파괴확률의 총합이 더 작기 때문이다. 따라서 비정상상태접근 방법에 의한 상수관망의 신뢰도 계산의 문제점은 상수관망의 크기가 커질수록 더욱 뚜렷이 나타난다고 할 수 있다. 정상상태접근방법으로 산정된 0.00067 또는 0.12181 의미는 파괴확률공식의 시간단위가 1년이므로 “CWA 상수관망에서 1년 동안 모든 minimum cutset이 정상상태로 운영될 가능성이 0.067% 또는 12.18%이다”로 해석될 수 있으며 상수관망의 규모로 볼 때 타당한 산정이라 판단된다.

본 연구에서 관파괴확률 산정을 위해 적용한 Su et al.(1987)과 Cullinane et al.(1989)식은 파괴에 미치는 다양한 인자를 반영하지 못하므로 관파괴확률을 전반적으로 크게 산정해 준다고 볼 수 있다. 따라서, 실제 자료를 바탕으로 작성된 정확한 관파괴확률식과 본 연구에서 제안된 방법을 적용한다면 보다 실제적이며 정확한 상수관망의 신뢰도 산정이 가능할 것으로 판단된다.

Table 3. Results of the Reliability Assessment for CWA

Pipe Failure Equation	Reliability of CWA	
	Success mode approach	Failure mode approach
Su et al.(1987)	0.00067	-6.08139
Cullinane et al.(1989)	0.12181	-4.09021

4. 결 론

본 연구에서는 기존 상수관망의 신뢰도 산정방법의 문제점인 상수관 파괴로 인한 피해영역 산정의 오류와 신뢰도추정 방법의 접근론적 오류를 개선할 수 있는 방안을 제시하였다.

- (1) 상수관 파괴가 발생할 때 실제 상수관망에 미치는 영향을 고려한 segment, 비의도적 구역고립과 수리학적인 압력저하지점을 상수관별로 산정하여 이를 상수관망의 신뢰도 산정에 반영하였다. 이를 통해서 기존 연구의 파괴된 상수관뿐 아니라 추가로 격리되거나 간접적인 용수사용성이 저하되는 지점을 상수관망의 신뢰도 산정에 반영하여 정확한 신뢰도 산정에 가능하였다.
- (2) Minimum cutset 방법은 상수관망의 정상상태를 반영하여 신뢰도를 계산할 경우 효율적이고 실제 상수관망에 쉽게 적용이 가능한 방법이며 본 연구에서는 기존 연구와 달리 minimum cutset의 기본 단위를 파괴된 단일 상수관이 아닌 제수밸브에 의해서 함께 격리되는 segment를 기본단위로 하여 minimum cutset의 파괴확률을 계산하여 실제 상수관망에서 발생하는 minimum cutset으로 묶여 있는 관의 차폐확률을 정확하게 계산하였다. 이는 segment가 두개 이상의 상수관망으로 구성될 경우 두개의 상수관을 독립적으로 고려할 때 보다 실제에 가까운 신뢰성 분석이 가능하다.
- (3) 비정상상태접근방법에서 minimum cutset간의 동시 파괴확률을 고려하지 않을 경우 실제 상수관망의 경우 정확한 상수관망의 신뢰도 산정이 어렵기 때문에 정상상태접근방법을 이용하여 간접적으로 minimum cutset간의 동시파괴확률을 고려하여 보다 정확하며 효율적인 상수관망의 신뢰도 산정이 가능하였다.
- (4) 실제 대규모 상수관망에 적용한 결과 비현실적인 결과를 나타내는 비정상상태접근방법과는 달리 보다 현실적인 결과의 산정이 가능하였다.
- (5) 특히 실질적이며 다양한 요인을 고려한 상수관 파괴확률 산정이 이루어질 경우 본 연구에서 제안된 방법과 함께 보다 현실적인 상수관망의 신뢰도 산정이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호 : R01-2004-000-10362-0)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 전환돈 (2005). "상수관 파괴시 관망의 부분적 격리를 고려한 피해범위 산정." *한국수자원학회지*, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 89-98.
- 전환돈, 김중훈 (2006). "상수관망의 부분적 격리를 위한 제수밸브 탐색 알고리즘." *상하수도학회지*, 한국상하수도학회, 제20권, 제1호, pp. 35-43.
- Billinton, R. and Allan, R.N. (1983). *Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques*. Pitman Books Limited, London.
- Cullinane, M.J., Lansey, K.E., Member, ASCE and Basnet, C. (1989). "Water distribution system design considering component failure during static conditions." *Hydraulic Engineering*, proceedings of the 1989 national conference on hydraulic engineering, pp. 762~767.
- Goulter, I.D. (1995). "Analytical and simulation models for reliability analysis in water distribution systems." *Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution System*, E. Cabrera and A. F. Vela, eds., Kluwer Academic, London.
- Jamil, A.T.M. and Ahmad, S.H. (1985). "Reliability derivation by cutset approach." *Microelectronics and reliability*, Vol. 25, No. 4, pp. 789~795.
- 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.
- Ross, S.M. (1985). *Introduction to probability models*. Academic Press Inc., Orlando.
- Schabe, H. (1995). "An improved algorithm for cutset evaluation from paths." *Microelectronics and Reliability*, Vol. 35, No. 5, pp. 783~787.
- 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, 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.

(논문번호:07-47/접수:2007.05.15/심사완료:2007.08.22)