

HSPDA 모형 및 ADF index를 이용한 상수관망의 신뢰도 산정

Estimation of the Reliability of Water Distribution Systems using HSPDA Model and ADF Index

백 천 우* / 전 환 돈** / 김 중 훈***

Baek, Chun Woo / Jun, Hwan Don / Kim, Joong Hoon

Abstract

In this study, new methodology to estimate the reliability of a water distribution system using HSPDA model is suggested. In general, the reliability of a water distribution system can be determined by estimating either the ratio of the required demand to the available demand or the ratio of the number of nodes with sufficient pressure head to the number of nodes with insufficient pressure head when the abnormal operating condition occurs. To perform this approach, hydraulic analysis under the abnormal operating condition is essential. However, if the Demand-Driven Analysis (DDA) which is dependant on the assumption that the required demand at a demand node is always satisfied regardless of actual nodal pressure head is used to estimate the reliability of a water distribution system, the reliability may be underestimated due to the defect of the DDA. Therefore, it is necessary to apply the Pressure-Driven Analysis (PDA) having a different assumption to the DDA's which is that available nodal demand is proportion to nodal pressure head. However, because previous study used a semi-PDA model and the PDA model which had limited applicability depending on the characteristics of a network, proper estimation of the reliability of a water distribution system was impossible. Thus, in this study, a new methodology is suggested by using HSPDA model which can overcome weak points of existing PDA model and Available Demand Fraction (ADF) index to estimate the reliability. The HSPDA can simulate the hydraulic condition of a water distribution system under abnormal operating condition and based on the hydraulic condition simulated, ADF index at each node is calculated to quantify the reliability of a water distribution system. The suggested model is applied to sample networks and the results are compared with those of existing method to demonstrate its applicability.

Keyword : Water Distribution System, Reliability Analysis, HSPDA, ADF index

요 지

본 연구에서는 HSPDA모형을 기반으로 한 상수관망의 신뢰도분석 방안을 제안하였다. 대표적인 상수관망의 신뢰도분석 방법으로는 수량과 수압의 확보가 불가능한 수요절점을 산정하고 필요수량/공급가능수량 혹은 압력확보절점

* Research Associate, School of Envir. Systems Eng. & Centre for Ecohydrology, Univ. of Western Australia, Crawley WA6009, Australia
** 교신저자, 서울산업대학교 공과대학 건설공학부 조교수
Corresponding Author, Associate Professor, School of Civil Eng., Seoul National Univ. of Tech., Seoul 139-743, Korea (e-mail: hwjun@snut.ac.kr)
*** 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부 교수
Professor, School of Civil, Envir. and Architect. Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

수/전체절점수 등을 계산하여 상수관망이 얼마나 신뢰할 수 있는가를 판단하는 것이 있다. 이를 계산하기 위해서는 수리모형을 이용한 상수관망의 모의가 필요하나 절점의 압력과는 상관없이 항상 모든 용수량은 공급가능하다는 가정을 사용하는 Demand-Driven Analysis (DDA) 를 신뢰도 분석에 사용할 경우 신뢰도가 과소 산정될 수 있으며, 절점수요는 절점수도에 비해한다는 가정을 사용하는 Pressure-Driven Analysis (PDA)의 적용이 필요하다. 그러나 기존에 수행된 많은 연구에서는 관망의 특성에 따라 제한적인 적용성을 가지는 PDA 모형과 semi-PDA모형이 비정상운영상태의 상수관망 수리모의에 이용되었고 이로 인하여 정확한 상수관망의 신뢰도 산정이 어려웠다. 본 연구에서는 기존의 PDA모형의 가지는 단점을 보완한 HSPDA 모형과 Available Demand Fraction (ADF) 지수를 이용하여 상수관망의 신뢰도 산정이 가능한 모형을 제안하였다. HSPDA를 활용하여 상수관망의 비정상운영상태를 모의하고, 이를 이용하여 절점별 ADF 지수를 산정, 상수관망의 신뢰도를 산정하였다. 제안된 신뢰도분석기법을 대상관망에 적용하여 기존의 연구결과와 비교하였으며, 이를 바탕으로 수립 가능한 신뢰도 확보방안을 제시하였다.

핵심용어 : 상수관망, 신뢰도 분석, HSPDA model, ADF지수

1. 서 론

상수관망은 인간생활과 직결된 시설물로 적절한 수압과 수질로 충분한 유량을 소비자가 공급받을 수 있도록 하는 것에 그 목적이 있다. 상수관망의 신뢰도는 상수관망의 상태를 표현하는 중요한 지표로서, 설계뿐만 아니라 적절한 유지관리 계획 수립에 있어서 중요한 역할을 하고 있다. 상수관망의 신뢰도 산정에 있어서 가장 핵심이 되는 사항은 신뢰도를 어떻게 정의하고, 정의된 신뢰도를 어떻게 정량화하는 가이다.

상수관망의 목적은 적절한 수압과 수질로 충분한 유량을 소비자에게 공급하기 위해서이며, 특정 시간동안 적절한 압력과 수질로 충분한 유량을 소비자에게 공급할 수 있는 능력을 상수관망의 신뢰도로 정의할 수 있다. 하지만 상수관망의 신뢰도를 정의할 수 있다하더라도, 정의된 신뢰도를 정량화하는 것은 쉽지 않은 문제이다. Mays (1996)가 상수관망의 신뢰도를 나타내는 명확한 정의가 어렵다고 언급한 이유도 실질적이고 효율적인 정량화가 가능한 신뢰도의 정의가 어렵기 때문이다. 신뢰도의 정량화가 어려운 이유는 크게, “상수관망의 신뢰도를 정량화하기 위해서 어떤 요소를 기준으로 사용할 것인가?”와 “결정된 요소를 어떤 식으로 반영하여 신뢰도를 정량화할 것인가?”를 결정해야하는 문제에서 기인한다.

특정 기간 동안 수요절점에서의 수량, 수압, 수질은 상수관망의 신뢰도 정량화를 위해 사용될 수 있는 대표적인 인자이다. 이들 세 가지 인자 중에서, 상수관망 내에서의 모의가 비교적 쉽지 않은 수질을 제외한 수량과 수압은 상수관망의 신뢰도 산정을 위한 기준으로써 관련된 많은 연구들에서 사용되어 왔다. 대표적인 상수관망의 신뢰도 산정 방법으로는 수원으로부터 수요절점까

지 물을 공급하는 경로 등과 같이 상수관망의 ‘구조적인 측면’에 문제가 있는가를 검토하고, 수요절점에서의 압력과 같이 ‘수리적인 측면’을 수리모형 등을 이용하여 검토하여, 이 결과의 정량화를 통해 상수관망의 신뢰도를 산정하는 방법이 있다. 이와 같은 과정을 수행하기 위해 많은 연구들이 수행되었으며, 상수관망의 신뢰도와 관련된 연구는 크게 ‘상수관망을 구성하는 요소(element)의 파괴(failure) 확률 산정’, ‘요소의 파괴로 인한 피해영역 산정’, ‘상수관망의 상태 평가’ 및 ‘상수관망의 신뢰도 추정 모형에 대한 연구’의 네 가지로 구분할 수 있다.

상수관 파괴확률과 관련된 연구로는 ① 상수관의 노후화 현상을 설명한 연구 (Oday, 1982; Lei and Saegrov, 1998), ② 상수관의 파괴확률을 추정한 연구(Andreou, 1986; Lei and Saegrov, 1998)로 구분할 수 있다. 상수관망을 구성하는 요소의 파괴로 인한 피해영역을 산정하는 방법은 크게, ① 파괴된 상수관 자체만을 대상으로 피해영역 추정 (Su *et al.*, 1987; Jowitt *et al.*, 1993), ② 제수 밸브에 의해 격리되는 상수관과 절점을 관망의 segment로 정의하여 피해영역 추정 (Walski, 1993, 2002), ③ 상수관 파괴로 인해 수원으로부터 비의도적으로 고립되는 비의도적 구역고립의 개념을 이용한 피해영역 추정 (Jun and Loganathan, 2007) 및 ④ 상수관파괴로 인해 변하게 되는 상수관망시스템의 수리조건을 고려하여 압력저하조건을 이용한 피해영역 추정 (Goulter and Coals, 1986; Cullinane *et al.*, 1989)의 네 가지로 구분할 수 있다. 상수관망의 상태 평가를 위한 연구는 ① 상수관파괴로 인한 시스템상태의 정량화 방안에 대한 연구 (Asgarpoor and Singh, 1992; Mays, 2003)와 ② 상수관망의 비정상상태의 원인을 규정하는 연구(Goulter and Coals, 1986; Xu *et al.*, 1999)로 구분할 수 있다. 상수관망의 신뢰도추

정 모형에 대한 연구로는 비교적 쉽게 프로그래밍이 가능하고, 다른 모형에 비하여 비교적 정확하면서도 효율적인 신뢰도를 찾을 수 있는 minimum cutset method (Billinton and Allan, 1983; Mays, 2003)를 비롯하여, event tree method, tieset method, conditional probability method, fault tree method, PNET method 등의 방법이 사용되어 왔다.

상수관망의 수리해석은 각 절점에서의 용수수요는 항상 만족시킨다는 가정 하에 각 절점의 수두를 계산하는 Demand-Driven Analysis (DDA)와 절점 수두에 따라 가능공급량이 변하는 Pressure-Driven Analysis (PDA)의 두 가지로 나눌 수 있다 (Mays, 2003). EPANET (Rossman, 1994) 등과 같은 DDA모형은 상수관망의 설계, 펌프운용, 밸브설치, 저수지 및 탱크 수위계산 등의 많은 분야에서 활용되어 왔다. 그러나 Gupta and Bhave (1996), Tanyimboh and Tabesh (1997a) 와 (1997b) 및 Mays (2003) 등은 상수관망이 정상상태인 경우에는 DDA의 적용에 문제가 없지만 화재가 발생하여 어떠한 절점에서의 용수수요가 급증하거나, 관거의 파손 등에 의해 충분한 절점수두가 보장되지 않는 경우와 같이 상수관망이 비정상상태인 경우, DDA를 이용한 관망해석 결과는 부압이 계산되는 것과 같은 비현실적인 결과를 줄 수 있다고 경고하였다 (백천우 등, 2007). 더욱이 기존에 수행된 상수관망의 신뢰도분석과 관련된 많은 연구에서는 기본적으로 관거, 밸브 등과 같이 시스템을 구성하는 요소의 파괴상황을 이용하여 신뢰도를 분석하였으며, 시스템을 구성하는 요소가 파괴된 상황은 시스템이 정상운영조건 하에 있는 것이 아니라 비정상운영조건 하에 해당한다. 관거파괴 상황과 같은 비정상운영조건하의 신뢰도 산정시 DDA를 사용할 경우, 모든 절점의 용수수요가 만족하는 것으로 가정하는 DDA의 특성상 발생하지 않는 추가적인 수두손실이 많이 발생하여 압력저하지점이 더 많이 발생하게 되거나 부압이 발생되어 전체 시스템의 신뢰도가 낮게 산정된다. Tanyimboh and Tabesh (1997a) 및 Mays (2003) 등은 이와 같은 사항을 지적하며 상수관망의 신뢰도 산정 시에 PDA 적용의 필요성을 강조하였다.

이와 같은 이유로 절점수요와 절점수두를 동시에 고려하는 PDA의 개념을 사용한 수리해석모형이 Bhave (1981)에 의해 최초로 제안되었으며, Node Flow Analysis (Bhave, 1981), Head-Driven Analysis (Tabesh *et al.*, 2001), Pressure Deficient Condition Analysis (Ang and Jowitt, 2006) 및 Pressure Dependent Demand Analysis (Wu and Walski, 2006; Wu *et al.*, 2006) 등은 PDA의 개념이 적용되어 개발된

수리해석 모형들이다. 기존에 개발된 PDA모형은 절점 수두-용수공급량 관계(nodal Head-nodal Outflow Relationship, HOR)을 이용하는 모형 (Bhave, 1981; Wu and Walski, 2006; Wu *et al.*, 2006; 백천우 등, 2007), Source Head Method를 이용하는 모형 (Tanyimboh and Tabesh, 1997b; Tanyimboh *et al.*, 1997, 2000; Tabesh *et al.*, 2001) 및 semi-PDA 모형 (Ozger, 2003; Ang and Jowitt, 2006)의 세 가지로 구분할 수 있다. HOR을 이용하는 모형은 절점특성에 따라 변하는 HOR식의 정의가 쉽지 않으며, 관망의 규모에 따라 절점수두에 따라 용수공급량이 변하는 PDA 해석이 어려운 문제가 있었다. 이 문제를 해결하기 위해 개발된 Source Head Method를 이용하는 모형과 semi-PDA 모형은, HOR식을 사용하지 않아 계산시간이 짧은 장점이 있지만 Source Head Method는 수원이 하나인 관망에만 적용이 가능하여 적용성에 제한이 있으며, semi-PDA 모형은 절점 용수수요의 변화를 단순히 물리적 현상에 의해 해석한 단점이 있다(백천우 등, 2007). 즉, 기존에 수행된 많은 연구에서는 PDA모형을 이용하여 상수관망을 수리모의하고, 이 결과를 신뢰도 분석에 사용하였지만, 관망의 규모, 저수지 수 등과 같이 관망의 특성에 따라 제한적인 적용성을 가지는 PDA 모형과 semi-PDA모형이 비정상운영상태의 상수관망 수리모의에 이용되었고 이로 인하여 정확한 상수관망의 신뢰도 산정이 어려웠다.

하지만, Wu and Walski (2006), Wu *et al.* (2006) 및 백천우 등 (2007)은 modified gradient method 및 최적화기법을 이용하여 PDA분석에 소요되는 시간을 획기적으로 단축시킨 모형을 개발하였고, 관망의 특성 등에 따라 적용에 제한이 없는 비정상운영상태의 상수관망 수리모의가 가능하게 되었다. 본 연구에서는 Ozger (2003) 및 Mays (2003)가 절점의 신뢰도 산정을 위해 제안한 Available Demand Fraction (ADF) 지수와 백천우 등 (2007)이 개발한 HSPDA (Harmony Search applied PDA) 모형을 이용한 상수관망의 신뢰도 산정 모형을 제안하였다. HSPDA를 이용하여 상수관망의 비정상운영상태에서의 수리학적 분석을 실시하고, 산정된 절점의 가능공급수량을 바탕으로 절점별 신뢰도 및 전체관망의 신뢰도를 산정하였다. 제안된 신뢰도 산정기법을 두 개의 관망에 적용하여 기존의 연구결과와 비교하였다.

2. HSPDA모형 및 ADF지수

2.1 HSPDA 모형

EPANET 등과 같은 DDA모형의 단점을 보완하기

위해 절점의 수두와 가능공급량을 동시에 계산하는 다양한 PDA모형이 개발되었으며, 전술한 바와 같이 개발된 PDA모형은 HOR을 이용하는 모형, Source Head Method를 이용하는 모형 및 semi-PDA 모형의 세 가지로 구분할 수 있다. Source Head Method와 semi-PDA 모형은 관망의 특성 등에 따라 적용에 제한이 있거나, 완전한 PDA의 개념이 사용되지 않음 모형들로, 정확한 상수관망의 신뢰도 산정을 위해서는 HOR을 이용하는 모형의 적용이 필요하다.

기존에 개발된 HOR을 이용하는 모형 중에서는 Wu and Walski (2006)와 Wu *et al.* (2006)의 모형이 모의 효율 면에서는 가장 우수한 모형이다. 하지만, 이 모형은 상업용 모형으로 source code가 공개되지 않았으며, 상수관망을 구성하는 많은 요소들의 파괴상황을 모의하기 위해서는 각각 요소의 파괴상황을 시나리오로 작성하여, 이를 일일이 입력 자료에 반영하여 모의해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 본 연구에서는 모의효율 면에서 Wu and Walski (2006)와 Wu *et al.* (2006)의 모형과 큰 차이가 없고 source code가 공개되어, 다양한 경우의 요소파괴상황을 쉽게 모의할 수 있는 백천우 등(2007)의 모형을 PDA분석을 위해 적용하였다. 백천우 등(2007)의 모형과 Ozger (2003) 및 Mays (2003)가 사용한 semi-PDA 모형을 이용하여 비정상운영상태인 상수관망을 모의하고, 그 결과를 이용하여 신뢰도분석을 실시하였다.

백천우 등(2007)은 발견적 탐색법의 하나인 화음탐색법 (Harmony Search, HS, Geem *et al.*, 2001)을 최적화 탐색기법으로 이용하고 수리해석엔진으로 EPANET을 연계한 HSPDA모형을 제안하였으며, 관거파괴상태와 화재발생상황에 대하여 DDA모형인 EPANET과 semi-PDA 모형(Ozger, 2003) 및 HSPDA모형의 적용결과를 비교분석하였다.

HSPDA모형의 기본 개념은 다음과 같다. 상수관망을 구성하는 각 절점의 절점수두를 가정하여 가정된 수두 (H_j^a , assumed head)에 따른 가능공급량을 가정(q_j^a , assumed demand)하고, 가정된 가능공급량(q_j^a)을 절점 용수량으로 입력하여 DDA (EPANET) 모의를 수행한다. DDA에 의해 계산된 절점수두(H_j^c , calculated head)와 가정된 절점수두(H_j^a)가 같아질 때 까지 반복계산을 실시한다. 반복계산에 의해 최종적으로 선정된 H_j^a ($\approx H_j^c$)와 q_j^a 가 실제 절점수두(H_j^{avbl} , available head)와 가능공급량(q_j^{avbl} , available demand)이 된다. Fig. 1은 HSPDA모형의 알고리즘을 나타내고 있다.

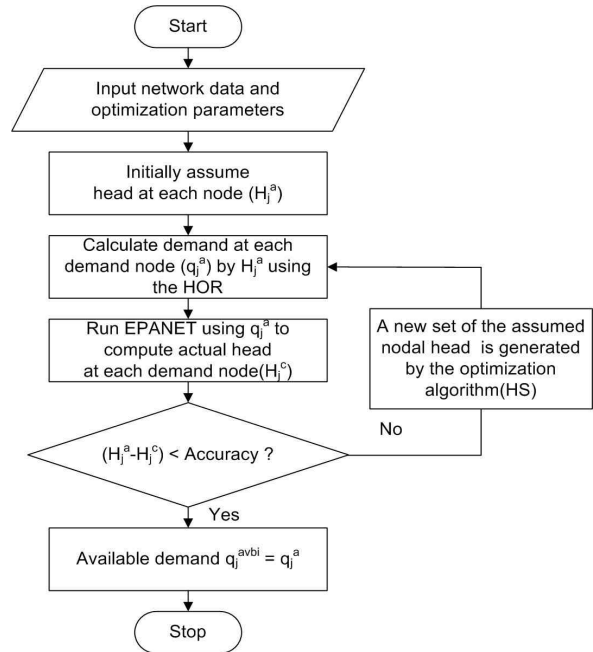


Fig. 1. Flowchart of HSPDA Model

Fig. 1에서 가정된 절점수두(H_j^a)에 따라 계산되는 가정된 가능공급량(q_j^a)은 Wagner *et al.* (1988)가 제안한 HOR식인 다음 Eqs. (1)~(3)에 의해 계산된다.

$$q_j^a = q_j^{req} \quad (\text{adequate-flow}), \quad \text{if } H_j^a \geq H_j^{des} \quad (1)$$

$$0 < q_j^a = q_j^{req} \left(\frac{H_j^a - H_j^{\min}}{H_j^{des} - H_j^{\min}} \right)^{1/n} < q_j^{req}, \quad (\partial\text{-flow}), \quad (2)$$

if $H_j^{\min} < H_j^a < H_j^{des}$

$$q_j^a = 0 \quad (\text{no-flow}), \quad \text{if } H_j^a \leq H_j^{\min} \quad (3)$$

여기서, q_j^a : 절점 j 의 가정된 공급량
(assumed demand at node j)

q_j^{req} : 절점 j 의 필요공급량
(required demand at node j)

H_j^a : 절점 j 의 가정수두 (assumed head at node j)

H_j^{\min} : 절점 j 의 최소필요수두
(required minimum head at node j)

H_j^{des} : 절점 j 의 설계수두 (design head at node j)

n : 절점 특성 지수

Eqs. (1)~(3)에서 H_j^{\min} 은 조금이라도 용수공급을 하기 위한 최소한의 절점수두로 일반적으로 절점의 표고를 적용하며, H_j^{des} 은 절점의 필요공급량을 모두 만족시키

기 위해 필요한 설계수두로, 일반적으로 두 가지 방법에 의해 결정된다. 첫 번째 방법은 최소동수압을 절점의 표고에 더한 값을 적용하는 것으로, 최소동수압 값으로는 15 m (Mays, 2003), 20 m (Goulter *et al.*, 2000) 등을 사용할 수 있다. 두 번째 방법은 다음 Eq. (4)와 같이 절점의 용수량에 의해 설계수두를 계산하는 Chandapillai (1991)의 식을 이용하는 방법이다.

$$H_j^{des} = H_j^{min} + R_j (q_j^{req})^n \quad (4)$$

Eq. (4)에서 R_j 와 n 은 절점의 특성에 따라 결정되는 상수로 수두와 유량의 단위에 따라 변하게 되며, Gupta and Bhawe (1996)는 수두단위 m와 유량단위 m^3/min 시에 0.1과 2.0을 R_j 와 n 으로 추천하였다. 본 연구에서는 절점의 설계수두 H_j^{des} 를 결정하기 위해 최소동수압을 이용하는 방법과 Chandapillai (1991)의 식을 이용하는 방법을 모두 적용하여 계산된 값 중 큰 값을 H_j^{des} 값으로 적용하였다. 또한 Eq. (4)에 사용되는 R_j 와 n 값은 Gupta and Bhawe (1996)가 사용한 0.1과 2.0을 사용하는 유량 및 수두 단위에 맞게 환산하여 사용하였다.

2.2 Semi-PDA 및 ADF지수

Ozger (2003)는 절점에서의 압력이 기준치 이하가 되면 필요한 용수수요를 만족시키지 못하게 되며, 이 기준치를 Minimum Required Pressure (MRP)라 정의하였다. 또한, DDA모형인 EPANET과 가상저수지를 이용한 semi-PDA 모형을 개발하였다. Semi-PDA 모형의 계산과정은 다음과 같다. EPANET을 이용한 수리해석 결과, MRP보다 압력이 작은 절점에는 가상저수지를 연결한다. 가상저수지를 연결하는 파이프는 매우 작은 길이와 큰 관경으로 설정하여 마찰손실을 최소화한다. 원래 절점의 용수수요는 0으로 설정하며, 가상저수지의 표고는 원래 절점의 표고와 MRP를 합한 값으로 설정한다. 가상저수지 설정 후 다시 수리계산을 실시하고 초기절점수요보다 많은 유량이 저수지로 유입되면, 그 절점의 가상저수지는 제거하고 다시 수리계산을 실시한다. 모든 가상저수지로의 유입량이 초기 용수수요보다 작은 경우, 계산을 마친다. MRP보다 압력이 작은 절점의 용수수요량은 가상저수지로의 유입량으로 설정한다.

Ozger (2003) 및 Mays (2003)는 semi-PDA 모형을 이용하여 상수관망을 구성하는 각 관거의 신뢰도 분석을 실시하였다. 특정 관이 파괴된 경우에 대하여 수리

모의를 실시하고, 계산된 절점의 가능공급량(q_j^{avl})과 필요공급량(q_j^{req})을 이용하여 수요절점의 신뢰도를 나타내는 ADF 지수를 Eq. (5)와 같이 제안하였다. 또한 Eq. (5)를 전체 상수관망으로 확장하여 전체 상수관망의 신뢰도 산정을 위한 ADFnet 지수를 Eq. (6)과 같이 제안하였다.

$$ADF_j = \frac{q_j^{avl}}{q_j^{req}} \quad (5)$$

$$ADF_{net} = \frac{\sum_{j=1}^m q_j^{avl}}{\sum_{j=1}^m q_j^{req}} \quad (6)$$

여기서 q_j^{avl} : 수요절점의 가능공급량,
 q_j^{req} : 수요절점의 필요공급량,
 m : 상수관망의 절점의 수,
 ADF_j : 수요절점의 신뢰도,
 ADF_{net} : 상수관망의 신뢰도

3. 적용 및 결과

3.1 소규모관망에의 적용

제안된 신뢰도 산정 기법을 Fig. 2와 같은 소규모 상수관망(Sample Network #1)에 적용하여 각 관거별 파괴상황에 대한 상수관망의 신뢰도 분석을 실시하였다. 적용된 관망은 ADF 지수의 적용성을 검토하기 위해 Mays (2003)가 사용한 관망으로, 대상 관망은 두 개의 저수지와 13개의 절점, 21개의 파이프로 구성되어 있으며, 각 절점과 파이프의 제원은 Table 1과 Table 2에 나타나 있다.

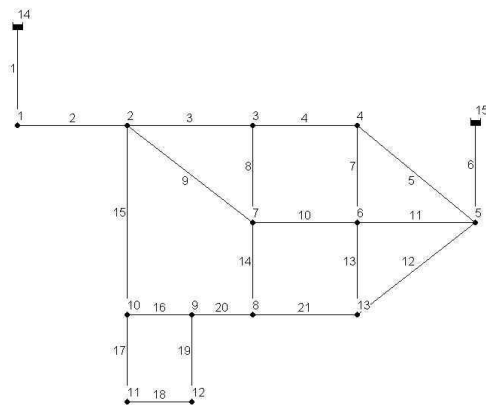


Fig. 2. Sample Network #1

Table 1. Node Characteristics (Sample Network #1)

Node ID	Elevation (m)	Base Demand (m^3/hr)	Node ID	Elevation (m)	Base Demand (m^3/hr)	Node ID	Elevation (m)	Base Demand (m^3/hr)
Node 1	27.43	0.00	Node 6	31.39	684.00	Node 11	35.05	108.00
Node 2	33.53	212.40	Node 7	29.56	640.80	Node 12	36.58	108.00
Node 3	28.96	212.40	Node 8	31.39	327.60	Node 13	33.53	0.00
Node 4	32.00	640.80	Node 9	32.61	0.00	Resvr 14	60.96	N/A
Node 5	30.48	212.40	Node 10	34.14	0.00	Resvr 15	60.96	N/A

Table 2. Pipe Characteristics (Sample Network #1)

Pipe ID	Length (m)	Diameter (mm)	Hazen-Williams Friction Coefficient	Pipe ID	Length (m)	Diameter (mm)	Hazen-Williams Friction Coefficients	Pipe ID	Length (m)	Diameter (mm)	Hazen-Williams Friction Coefficient
Pipe 1	609.60	762	130	Pipe 8	944.88	254	116	Pipe 15	944.88	305	102
Pipe 2	243.80	762	128	Pipe 9	1676.40	381	114	Pipe 16	579.00	305	100
Pipe 3	1524.00	609	126	Pipe 10	883.92	305	112	Pipe 17	487.68	203	98
Pipe 4	1127.76	609	124	Pipe 11	883.92	305	110	Pipe 18	457.20	152	96
Pipe 5	1188.72	406	122	Pipe 12	1371.60	381	108	Pipe 19	502.92	203	94
Pipe 6	640.08	406	120	Pipe 13	762.00	254	106	Pipe 20	883.92	203	92
Pipe 7	762.00	254	118	Pipe 14	822.96	254	104	Pipe 21	944.88	305	90

Table 3. Network ADFs Resulting from Single Pipe Break on the Sample Network #1

Pipe ID	Pipe Diameter (mm)	Flows under Normal Condition (m^3/hr)	$\sum q^{avbl} (m^3/hr)$		$ADF_{\neq t}$	
			2253.29	HSPDA	semi-PDA	HSPDA
1	762	2253.29	1233.81	1637.36	0.3921	0.5204
2	762	2253.29	1233.81	1637.25	0.3921	0.5204
3	609	1211.87	2390.72	2749.60	0.7598	0.8739
4	609	791.11	2825.85	3006.80	0.8981	0.9556
5	406	66.39	3102.57	3136.58	0.9861	0.9969
6	406	893.11	1309.00	2991.56	0.4160	0.9508
7	254	216.71	3097.30	3134.68	0.9844	0.9963
8	254	208.35	3095.90	3134.19	0.9839	0.9961
9	381	545.17	2846.44	3002.19	0.9047	0.9542
10	305	37.02	3103.72	3136.88	0.9864	0.9970
11	305	304.41	3062.98	3121.77	0.9735	0.9922
12	381	309.91	3039.12	3115.85	0.9659	0.9903
13	254	125.86	3103.00	3136.73	0.9862	0.9969
14	254	75.70	3092.60	3132.73	0.9829	0.9957
15	305	283.86	2930.40	3007.53	0.9314	0.9559
16	305	164.80	3038.40	3119.12	0.9657	0.9913
17	203	119.06	3027.60	3077.86	0.9622	0.9782
18	152	11.06	3108.48	3136.40	0.9879	0.9968
19	203	96.94	3046.67	3089.72	0.9683	0.9820
20	203	67.86	3145.15	3146.15	0.9996	0.9999
21	305	184.04	3015.84	3099.37	0.9585	0.9851

대상 상수관망을 구성하는 모든 관거의 파괴 상황에 대하여 semi-PDA 및 HSPDA 모형을 이용하여 공급가능수량을 산정하였으며, 절점별 ADF지수를 이용하여 전체 시스템의 신뢰도를 산정하였다. HSPDA모형에서 사용되는 Eq. (2)의 계수 n 은 2.0을 적용하였으며, 최적화기법인 화음탐색법의 주요인자 값으로 HMCR=0.8, PAR=0.2 및 HMS=50을 적용하였고, 최대반복계산 횟수는 1,000회, 모든 절점에서의 가정수두와 계산수두의 차가 0.01 m이내인 경우 최적해 탐색을 마치는 것으로 종결조건을 설정하였다. 신뢰도 산정 결과는 다음 Table 3과 같다.

일반적으로 평상시 유량이 큰 관거의 경우, 파괴시에 전체 시스템에 미치는 영향이 클 것이다. 하지만 Pipe 15의 경우 평시 관내 유량은 $283.86 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로, Pipe 4의 $791.11 \text{ m}^3/\text{hr}$ 보다 절반 이상 작지만 파괴시에 산정되는 시스템의 신뢰도는 비슷한 값을 나타내고 있다. 즉 특정 관거내의 평시유량과 파괴시의 시스템 신뢰도가 항상 비례하는 것은 아니며, 상수관망의 신뢰도 산정에 있어서 실질적인 수리모의가 필수적인 것으로 판단된다. Table 3에 나타난 것과 같이, 총 21개의 관거에 대한 파괴상황 시 전체시스템의 가능공급량은 HSPDA모형의 결과가 semi-PDA의 결과보다 높게 산정되었다. 따라서 절점에서의 가능공급량을 신뢰도 분석에 사용하는 ADF_{net} 값은 HSPDA의 적용결과가 semi-PDA의 적용결과보다 높게 산정된다. 물론 전체시스템의 가능공급량 산정 결과가 semi-PDA보다 HSPDA가 항상 높게 산정된다고 말할 수는 없으며 대상관망의 경우 높게 산정되었을 뿐이다. 하지만 2.1절에 전술한 바와 같이 semi-PDA모형은 절점 용수수요의 변화를 단순히 물리적 현상에 의해 해석한 단점이 있다(백천우 등, 2007). 따라서 절점에서의 가능공급량을 신뢰도 분석에 사용할 경우, 정확한 가능공급량 산정이 필수적이며, PDA의 개념이 보다 정확하게 구현된 HSPDA의 결과가 실질적인 상수관망의 신뢰도를 나타낸다고 판단할 수 있다.

3.2 대규모관망에의 적용

제안된 신뢰도분석 방법을 대규모 상수관망인 Sample Network #2에 적용해 보았다. 적용된 상수관망은 semi-PDA모형의 적용성 검토를 위해 Ozger (2003)가 사용한 EPANET의 샘플 네트워크인 Net3 network으로, Net3 network은 92개의 절점, 117개의 파이프, 2개의 저수지, 3개의 탱크 및 2개의 펌프로 구성되어 있으며 관망의 구성은 Fig. 3과 같다.

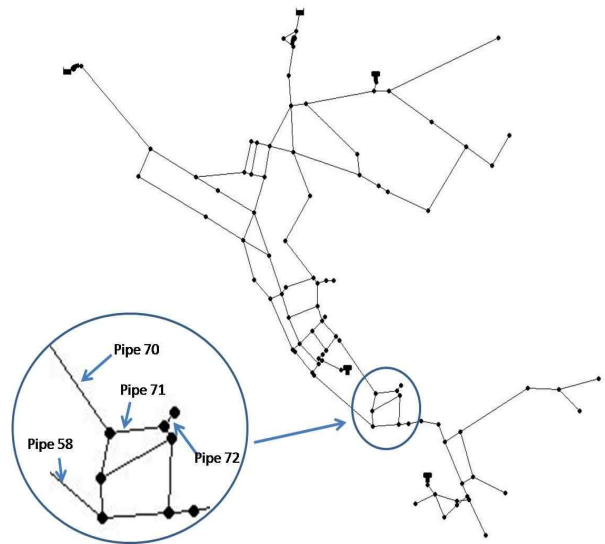


Fig. 3. Sample Network #2

최적화기법인 화음탐색법의 주요인자 값으로 HMCR=0.8, PAR=0.2, SAR=0.05 및 HMS=50을 적용하였고, 모든 절점에서의 가정수두와 계산수두의 차가 1.5 cm (=0.05ft)이내인 경우 최적해 탐색을 마치는 종결조건으로 설정하였다. 각 절점의 표고를 H_j^{min} 값으로 적용하였고 H_j^{des} 값은 MRP 값을 절점의 표고에 더하여 계산하였다. 적용된 MRP값은 Ozger (2003)가 적용한 31.64 m (=103.8ft, 45psi)을 사용하였다. 즉, 압력수두가 31.64 m 이상인 경우 필요공급량을 모두 만족시키며 압력수두가 31.64 m이하인 경우 Eqs. (1)~(3)에 의해 계산된 가능공급량만 공급이 가능하게 된다. Sample Network #2의 Extended Period Simulation 기간 중 모든 탱크와 저수지에서 용수가 공급되는 시간 때인 11:00시의 절점 수요를 이용하여 모형을 적용하였으며, 이 때 시스템의 총 용수공급량은 $12,219 \text{ Gal}/\text{min}$ 이다.

총 117개의 관거의 파괴상황에 대한 신뢰도를 산정하였으며, 그 결과 전체 117개 관거 중 112개의 관거는 파괴 시에도 95 %이상 전체시스템의 신뢰도를 보장하나, 5개(72, 51, 109, 49 및 70번)의 관거는 파괴 시에 95 %이하의 신뢰도를 보장하고 있는 것으로 나타났다. Table 4는 이 중 낮은 신뢰도를 나타내는 하위 12개 관거의 파괴상황에 대한 신뢰도 산정결과를 나타내고 있다. Table 4에 나타난 신뢰도 하위 12개 관거 중 95 %이하의 신뢰도를 나타내는 5개 관거(72, 51, 109, 49 및 70번)는 문제발생시 전체시스템에 많은 영향을 미치며 다른 관거에 비해 중요한 관거로 판단할 수 있다. 즉 상수관망의 효율적인 유지관리를 위해 보다 집중적인 관리가 필요할 것이다. 특히, Pipe 72, 70 및 71의 경우 평

**Table 4. Calculated ADFs under the Condition of a Single Pipe Failure
(Sample Network #2, Lower-ranked 12 Pipes of 117)**

Pipe ID	Pipe Diameter (in)	Flows under Normal Condition (Gal/min)	$\sum q^{abl}$ (Gal/min)	ADF_{net}	Pipe ID	Pipe Diameter (in)	Flows under Normal Condition (Gal/min)	$\sum q^{abl}$ (Gal/min)	ADF_{net}
72	24	4,613	7,604	0.6223	30	8	367	11,850	0.9698
51	24	1,801	10,416	0.8524	31	8	360	11,857	0.9704
109	24	1,358	10,416	0.8524	81	16	215	12,002	0.9822
49	30	4,973	11,139	0.9115	82	16	105	12,112	0.9912
70	24	4,973	11,138	0.9116	97	10	65	12,152	0.9945
71	24	4,721	11,699	0.9574	27	16	51	12,166	0.9956

시유량과 직경이 유사함에도 불구하고, 파괴 시에 산정되는 시스템의 신뢰도는 0.6223, 0.9116 및 0.9574로 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 특히 Pipe 70과 71의 경우 두 개관이 직결되어 있음에도 불구하고 신뢰도 값에 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 결과를 보이는 이유는 다음과 같다. Pipe 72의 경우 이후에 연결된 수요절점이 1개뿐이지만, 이 수요절점의 용수수요가 커서 파괴 시에 낮은 신뢰도 값을 나타낸다. 하지만 Pipe 70은 Sample Network #2의 우하단부에 용수를 공급하는 중요 관으로 파괴 시에 전체 관망의 수리특성에 많은 영향을 미치게 된다. 평상시 Pipe 70을 통해 관망의 우하단부로 공급되던 유량은, Pipe 70 파괴 시에 Pipe 58을 통해 전달되어야 하지만, Pipe 58은 직경이 Pipe 70의 절반으로 대상관망의 우하단부에 소요유량을 공급하기 위해 많은 수두손실을 유발시키게 된다. 즉 시스템의 신뢰도 저하의 중요 원인이 된다. 하지만 Pipe 71의 경우에는 Pipe 70과 인접하였음에도 불구하고, Pipe 70과 달리 파괴 시에 관망의 수리특성에 영향을 주는 부분이 작아 Pipe 70보다 높은 신뢰도 값을 나타내게 된다. 즉 Sample Network #1에서와 같이 특정 관거내의 평시유량과 파괴시의 시스템 신뢰도가 항상 비례하는 것은 아니며, 이와 같은 결과는 상수관망의 신뢰도 산정에 있어서 실질적인 수리모의의 필요성을 다시 한 번 나타내고 있다고 판단된다.

4. 결 론

상수관망의 신뢰도분석은 신뢰도로써 의미가 있으며 계산이 가능한 신뢰도를 정의하고 이를 정량화하기 위한 방안을 필요로 한다. 이 논문은 상수관망의 신뢰도 산정과 관련된 많은 논문에서 신뢰도산정을 위해 기준

으로 사용한 공급가능수량에 관련된 사항에 초점을 맞추었다. 많은 연구에서 언급한 것과 같이 비정상운영상태 하인 상수관망의 수리모의에는 PDA가 적합하며, 특히 신뢰도 분석에 DDA를 사용할 경우 신뢰도가 과소산정 될 우려가 있다. 따라서 용수공급경로가 확보되었다 하더라도, 수요절점에서 압력이 부족할 경우 용수공급이 이루어지지 않을 점에서 기인하여 개발된 PDA모형을 이용하여 실질적인 공급가능수량과 절점압력을 계산하고, 계산된 공급가능수량과 절점압력을 동시에 고려하여 상수관망의 신뢰도를 산정할 수 있는 방안을 제시하였다. 제안된 신뢰도분석기법을 소규모 및 대규모 대상관망에 적용하여 기존의 연구결과와 비교하였다.

소규모관망에 적용한 결과, ADF_{net} 지수는 HSPDA 모형의 적용결과가 semi-PDA 모형의 적용결과보다 높게 산정되었다. 적용하는 관망에 따라 적용결과는 차이가 있을 것이나, 절점 용수수요의 변화를 단순히 물리적 현상에 의해 해석한 semi-PDA모형보다는 HOR을 이용한 HSPDA모형의 결과가 상수관망의 신뢰도산정에 보다 적합할 것으로 판단된다. 대규모관망에 적용한 결과, 전체 117개 관거 중 112개의 관거는 파괴 시에도 95 %이상 전체시스템의 신뢰도를 보장하나, 5개의 관거는 파괴 시에 95 %이하의 신뢰도를 보장하고 있는 것으로 나타났다. 즉 이들 5개 관거는 문제발생시 전체 시스템에 많은 영향을 미치며 상수관망의 효율적인 유지관리를 위해 보다 집중적인 관리가 필요한 관거로 판단할 수 있었다.

참 고 문 헌

백천우, 전환돈, 김중훈 (2007). “비정상 상태의 상수관망 해석을 위한 HSPDA 모형의 개발.” **대한토목학**

- 회 논문집, 대한토목학회, 제27권, 제5B호, pp. 475-488.
- Andreau, S.A. (1986). *Predictive models for pipe break failures and their implications on maintenance planning strategy for deterioration water distribution system*, PhD dissertation, MIT, Cambridge, MA.
- Ang, W.K. and Jowitt, P.W. (2006). "Solution for water distribution systems under pressure-deficient conditions." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 132, No. 3, pp. 175-182.
- Asgarpoor, S. and Singh, C. (1992). "A new index for generation capacity reliability studies-expected cost penalty." *Electronic Power Systems Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 23-29.
- Bhave, P.R. (1981). "Node flow analysis of water distribution systems." *Transportation Engineering Journal of ASCE (Proc. Of The ASCE)*, ASCE, Vol. 107, No. TE4, pp. 457-467.
- Billinton, R. and Allan, R.N. (1983). *Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques*, Pitman Books Limited, London.
- Chandapillai, J. (1991). "Realistic simulation of water distribution system." *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 2, pp. 258-263.
- Cullinane, M.J., Lansley, K.E., and Basnet, C. (1989). "Water distribution system design considering component failure during static conditions, Hydraulic engineering." *Proc. of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering*, pp. 762-767.
- Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, G.V. (2001). "A new heuristic optimization technique: harmony search." *Simulation*, Vol. 14, No. 1, pp. 34-39.
- Goulter, I.D., and Coals, A.V. (1986). "Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks." *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 3, pp. 287-301.
- Goulter, I.D., Walski, T.M., Mays, L.W., Sakarya, B., Bouchart, F., and Tung, Y.K. (2000). "Reliability analysis for design." *Water Distribution System Handbook*, Mays, L.W., McGraw-Hill, New York.
- Gupta, R., Bhave, P.R. (1996). "Comparison of methods for predicting deficient-network performance." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 122, No. 3, pp. 214-217.
- Jowitt, P.W. and Xu, C. (1993). "Predicting pipe failure effects in water distribution networks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 119, No. 1, pp. 18-31.
- Jun, H., and Loganathan, G.V. (2007). "Valve-controlled segments in water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 133, No. 2, pp. 145-155.
- Lei, J. and Saegrov, S. (1998). "Statistical approach for describing failures of water mains." *Water Science and Technology*, IWA, Vol. 38, No. 6, pp. 209-217.
- 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. (2003). *Water supply systems security*, McGRAW-HILL.
- Oday, D.K. (1982). "Organizing and analyzing break data for making water main replacement decisions." *Journal American Water Works Association*, AWWA, Vol. 74, No. 11, pp. 588-594.
- Ozger, S.S. (2003). *A semi-pressure-driven approach to reliability assessment of water distribution network*, Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona.
- Rossman, L.A. (1994). *EPANET users manual*, Drinking Water Research Division, Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- Su, Y.C., Mays, L.W., Duan, N. and Lansley, K.E. (1987). "Reliability based optimization model for water distribution systems." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 12, pp. 1539-1556.
- Tabesh, M., Tanyimboh, T.T. and Burrows, R. (2001). "Extended period reliability analysis of water distribution systems based on head driven simulation method." *Proc. of World Water Congress 2001*, Orlando, Florida, USA.
- Tanyimboh, T.T., and Tabesh, M. (1997a).

- “Discussion comparison of methods for predicting deficient-network performance.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 369-370.
- Tanyimboh, T.T. and Tabesh, M. (1997b). “The basis of the source head method of calculating distribution network reliability.” *Proc. of the 3rd International Conference on Water Pipeline System*, Hague, Netherlands.
- Walski, T.M. (1993). “Water distribution valve topology for reliability analysis.” *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 42, No. 1, pp. 21-27.
- Walski, T.M. (2002). “Issues in providing reliability in water distribution systems.” *Proceedings of the ASCE Environmental and Water Resources Institute (EWRI) Annual Conference*, Roanoke, Virginia.
- Wu, Z.Y., and Walski, M. (2006). “Pressure-dependent hydraulic modelling for water distribution systems under abnormal conditions.” *Proc., IWA World Water Congress and Exhibition*, IWA, Beijing, China.
- Wu, Z.Y., Wang, R.H., Walski, T.M., Yang, S.Y., and Bowdler, D. (2006). “Efficient pressure dependent demand model for large water distribution system analysis.” *Proc., 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis*, ASCE, Cincinnati, Ohio, USA.
- Xu, C., Goulter, I.C. and Member, ASCE (1999). “Reliability-based optimal design of water distribution networks.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 125, No. 6, pp. 352-362.

논문번호: 09-133	접수: 2009.12.04
수정일자: 2010.01.14/01.25	심사완료: 2010.01.25