韓國水資源學會論文集
第43卷 第9號 · 2010年 9月
pp. 769~780

DOI: 10.3741/JKWRA.2010.43.9.769

HSPDA모형과 거리척도방법을 이용한 상수관망의 신뢰성분석

Estimating the Reliability of Water Distribution Systems Using HSPDA Model and Distance Measure Method

백 천 우* / 전 환 돈** / 김 중 훈***

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

Abstract

Topological and hydraulic assessments to examine whether required demand and pressure are satisfied and using these assessed results as a criteria have been general methodology for reliability assessment of water distribution systems. However, many of existing studies that used nodal pressure calculated by hydraulic assessment for reliability assessment have two major issues to be solved. The one is that demand-driven analysis was used for hydraulic assessment and the other is that serviceability was not considered for reliability assessment. In addition, all of the studies used pressure-demand analysis which is suitable to hydraulic analysis for water distribution systems under abnormal operating condition considered only available nodal demand for reliability assessment. This means that advantages which can be obtained by pressure-driven analysis are not used properly and efficiently. In this study, new methodology for reliability assessment of water distribution systems using HSPDA model and distance measure method is suggested. This methodology considers both nodal pressure and nodal available demand for reliability assessment. Suggested methodology is applied to two water distribution systems to show its applicability and application results are compared with existing study.

Keywords : water distribution system, reliability analysis, HSPDA, distance measure method

요 지

'위상적 평가'와 '수리학적 평가'를 통해 수요절점에서 필요한 수량을 필요한 압력으로 충분히 공급할 수 있는지의 여부를 정량화하고 이를 신뢰성의 산정을 위한 기준으로 사용하는 것은 대표적인 상수관망시스템의 신뢰성산정 방법이다. 하지만 '수리학적 평가'를 이용한 수요절점에서의 압력확보 여부를 신뢰성 산정에 사용한 기존의 연구들은 'Demand-Driven Analysis의 사용'과 '사용성의 미고려'라는 두 가지 측면에 있어서 문제가 있다. 또한 비정상상태인 상수관망시스템의 수리모의 적합한 Pressure-Driven Analysis를 이용한 연구들도 신뢰성 산정에 있어 가능공급량만을 고려하고 사용성을 고려하지 않아, Pressure-Driven Analysis의 장점이 효율적으로 사용되지 않은 단점이 있다. 본 연구에서는 기 개발된 Pressure-Driven Analysis 모형인 HSPDA모형과, 거리척도 방법을 이용하여 수량과 수압을 동시에 고려하는 신뢰성 분석기법을 제안하였다. 제안된 기법을 상수관망에 적용하여 기존의 연구결과와 비교하였고 이를 바탕으로 수립 가능한 신뢰성 확보방안을 제시하였다.

핵심용어 : 상수관망시스템, 신뢰도 분석, HSPDA model, 거리척도방법

* Research Associate, School of Envir. Systems Eng. & Centre for Ecohydrology, Univ. of Western Australia, Crawley WA6009, Australia (e-mail: baek@sese.uwa.edu.au)

** 교신저자, 서울산업대학교 공과대학 건설공학부 조교수 (e-mail: hwjun@snut.ac.kr)
Correspondent, Associate Professor, School of Civil Eng., Seoul National Univ. of Tech., Seoul, Korea

*** 고려대학교 공과대학 건축 · 사회환경공학부 교수 (e-mail: jaykim@korea.ac.kr)
Professor, School of Civil, Envir. and Architect. Eng., Korea Univ., Seoul, Korea

1. 서 론

상수관망시스템의 신뢰도는 용수공급을 위한 상수관망시스템의 상태를 나타내는 중요한 지표로서, 시스템의 설계 및 유지관리 계획 수립에 있어서 매우 중요한 기준으로 사용되어 왔다. 상수관망시스템의 신뢰도 산정에 있어 가장 중요한 사항은 '상수관망시스템의 신뢰도를 무엇을 이용하여 정의하고 '어떤 식으로 정량화 할 것인가'이다. Mays (1996)는 실질적이고 효율적이며 정량화가 가능한 신뢰도의 정의가 어렵기 때문에 상수관망시스템의 신뢰도를 나타내는 명확한 정의가 어렵다고 언급하였으며, Goulter et al. (2000)은 '신뢰도산정을 위한 많은 지수가 제안되었으나, 이 중 보편적으로 사용할 수 있는 기법은 없으며 각각의 지수 모두 사용목적에 따라 의미가 있다' 라고 지적하였다. 또한, Ostfeld (2004)는 실제 계산이 가능하고 의미가 있으며 적합한 신뢰도 산정기법을 어떻게 정의하는가가 상수관망시스템의 신뢰도분석에 있어 가장 큰 어려운 사항이라고 하였다. 즉 상수관망시스템의 신뢰도를 산정하기 위해서는 신뢰도가 의미하는 바를 나타내는 정의가 우선되어야 하며, 어떤 인자를 신뢰도 산정에 사용할지를 결정하고 이를 정량화 할 수 있는 방안이 필요하다.

상수관망시스템의 목적이 적절한 수압과 수질로 충분한 유량을 소비자에게 공급하는 데에 있다는 점을 고려하면, 상수관망시스템의 신뢰도는 "the probability that the system will perform its specified tasks under specified conditions and during a specified time (Kaufmann et al., 1977)" 또는 "특정 기간 동안 적절한 압력과 수질로 충분한 유량을 소비자에게 공급할 수 있는 능력 (백천우 등, 2010)" 등으로 정의할 수 있다. 하지만 이와 같이 정의된 상수관망시스템의 신뢰도 정량화는 쉽지 않은 문제이다. 신뢰도의 정량화가 어려운 이유는 크게, "상수관망시스템의 신뢰도를 정량화하기 위해서 어떤 요소 (인자)를 기준으로 사용할 것인가?"와 "결정된 요소를 어떤 식으로 반영하여 신뢰도를 정량화할 것인가?"를 결정해야하는 문제에서 기인한다 (백천우 등, 2010).

일반적인 상수관망시스템의 신뢰도의 정의를 고려할 때, 특정 기간 동안 수요절점에서의 수량, 수압, 수질은 상수관망시스템의 신뢰도 정량화를 위해 사용될 수 있는 대표적인 인자이다. 실제 기존에 수행된 상수관망시스템의 신뢰도와 관련된 연구들의 내용을 비교/정리한 Mays (1996), Goulter et al. (2000), Ostfeld (2004) 및 백천우 등 (2010)에 의하면, 많은 연구들에서 관망 내에서의 변화 해석이 쉽지 않은 수질을 제외한 수요절점에서의 가능공급량과 수압을 신뢰도 산정에 있어서의 기준으로 사용하였다. 수요절점에서의 가능공급량과 수압을 상수관망시스템의 신뢰도 산정에 사용하는 대표적인 방법으로는 수요절점에서 필요한 수량을 필요한 압력으로 충분히 공급할 수 있는지의 여부를 '위상적 평가'와 '수리학적 평가' 등을 이용해 정량화 하고, 이를 시스템 신뢰도의 산정을 위한 기준으로 사용하는 방법이 있다. '위상적 평가'는 수원으로부터 수요절점까지 물을 공급하는 경로와 같이 상수관망시스템의 구조적인 문제를 검토하는 것이며, '수리학적 평가'는 수리모형 등을 이용하여 수요절점에서의 압력이 충분한가를 검토하는 것이다. 또한 '위상적 평가'와 '수리학적 평가'의 결과를 신뢰도 산정에 이용하는 방법은 크게 두 가지로 구분 할 수 있다. 첫째는 상수관망시스템을 구성하는 수요절점들 중에 수량과 수압의 확보가 불가능한 수요절점의 존재 여부에 따라 전체 상수관망시스템의 안정 혹은 불안정의 상태를 판단하는 것이다. 이 방법은 상수관망시스템을 구성하는 많은 요소들의 노후화 등을 고려하여 장기간의 시스템 신뢰도를 산정하는 방법으로 대표된다. 둘 째, 수량과 수압의 확보가 불가능한 수요절점을 산정하고 '필요수량/공급가능수량' 혹은 '압력확보절점수/전체절점수' 등을 계산하여 특정 시점의 상수관망시스템이 얼마나 신뢰할 수 있는가를 판단하는 것이다. 후자의 경우, 정확한 가능공급량과 절점수압의 산정이 신뢰도 산정에 있어 가장 중요한 역할을 한다.

한편, 용수공급경로가 확보되었다 하더라도, 수요절점에서 압력이 부족할 경우 필요한 용수공급이 이루어지지 않을 것이며, 이와 같은 이유로 인해 수요절점에서의 압력확보 여부는 신뢰도 산정에 있어 중요한 인자로 고려되었다 (Goulter and Coals, 1986; Cullinane, 1986; Su et al, 1987; Mays, 2003). 하지만 이와 관련된 기존의 연구들은 크게 "Demand-Driven Analysis (DDA)의 사용"과 "사용성의 미고려"라는 두 가지 측면에 있어서 문제가 있다.

상수관망시스템의 수리해석은 각 절점에서의 용수수요는 항상 만족시킨다는 가정 하에 절점수두를 계산하는 DDA (EPANET, KYPIPE 등)와 절점 수두에 따라 가능공급량과 절점수두가 결정되는 Pressure-Driven Analysis (PDA)로 구분할 수 있다 (Mays, 2003). 기존의 연구에서 상수관망시스템의 설계, 펌프운용, 밸브설치, 저수지 및 탱크 수위계산 등의 '수리학적 평가'를 위해 사용된 기법은 대부분 DDA였지만 화재발생으로 인한 용수수요 급증, 관거 파손 등과 같이 상수관망시스템이 비정상상태인 경우 DDA는 수요절점에서 부압이 계산되는 것과 같은 비현실적인 결과를 제공할 수 있다 (Gupta and Bhave, 1996; Tanyimboh and Tabesh, 1997; Mays, 2003). 특히, 기존에 수행된 많은 연구에서는 시스템을 구성하는 요소 (관거, 밸브 등)의 파괴상황을 이용하여 신뢰성을 분석하였

지만, 시스템의 구성요소가 파괴된 상황은 시스템이 비정상운영조건인 것을 의미한다. 비정상운영조건의 수리계산에 DDA를 사용할 경우, 모든 절점의 용수수요가 만족하는 것으로 가정하는 DDA의 특성상 실제 공급 가능한 양보다 많은 유량이 공급되는 것으로 수리모의가 수행되고 이는 발생하지 않아야 되는 수두손실이 많이 발생하여 압력저하지점이 더 많이 발생하거나 부압이 발생되어 신뢰도 과소산정을 유발할 수 있다(백천우 등, 2010). Tanyimboh and Tabesh (1997) 및 Mays (2003) 등은 이와 같은 사항을 지적하며 상수관망시스템의 신뢰성 산정 시에 PDA 적용의 필요성을 강조하였다.

실제 압력조건에 따라 변하는 절점의 가능공급량을 계산하지 못하는 DDA모형과 달리, PDA모형은 절점에서의 압력과 함께 가능공급량을 결과로 제공할 수 있으며, DDA를 이용한 신뢰성분석기법의 단점을 보완 할 수 있다. 하지만 대부분의 PDA모형을 이용한 연구에서는 모형의 개발에 초점이 있어 신뢰성 분석을 실시하지 않았거나, DDA모형을 이용하여 신뢰성을 분석한 다른 연구와 같이 가능공급량만이 신뢰성 분석을 위한 기준으로 사용(Goulter and Coal, 1986; Su et al., 1987; Wagner et al., 1988; Fujiwara and Ganesharajah, 1993; Tanyimboh et al., 2000; Tabesh et al., 2001; Tabesh et al., 2004; Ozger, 2003; Mays, 2003; Ang and Jowitt, 2006, 백천우 등, 2010) 되었다. 하지만, 소방용수의 경우에서와 같이 낮은 압력조건하에서는 용수사용이 일부 가능하겠지만 사용성이 떨어지게 되고, 결국 소비자가 느끼는 서비스의 만족도가 저하될 것이다. 따라서 가능공급량만을 신뢰성 분석을 위한 기준으로 사용할 경우, PDA를 통해 얻을 수 있는 가장 중요한 정보인 수량과 수압이 동시에 고려되지 않고, 이는 PDA 모형의 장점이 효율적으로 사용되지 않은 것이라 할 수 있다.

상수관망시스템의 신뢰성 분석을 위해 수량과 수압을 동시에 고려하기 위해서는, 이 두 가지 기준을 통합하여 평가할 수 있는 하나의 기준이 필요하다. 그러나 이 두 가지는 기본적으로 단위의 차원이 달라 1대1 대응을 통한 비교가 불가능하다. 의사결정을 위해 고려해야 할 결정변수가 다수 존재할 경우, 최선의 의사결정을 수립하기 위해 사용되는 대표적인 방법이 다기준의사결정 기법(MCDM, Multi Criteria Decision Making)이다. Borda (1781)는 점수화의 개념을 이용하여 의사결정자들이 부여하는 대안들의 순위를 대안들의 가치로 인식하고 최소순위합을 가진 대안을 합의안으로 선택하는 다기준의사결정 기법을 최초로 제안하였으며, 이후 거리척도최소화 방법(Kemeny and Snell, 1962)을 비롯하여 AHP (Analytical Hierarchical Process; Saaty, 1980), PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod Enrichment Evaluations; Brans and Vincke, 1985), DEA (Data Envelopment Analysis; Charnes et al., 1978) 및 ELECTRE (ELimination Et Choice Translating REality; Roy, 1991) 등과 같은 다기준의사결정기법이 제안되었다.

거리척도 최소화를 이용한 그룹의 의사결정 연구는 다기준의사결정 기법의 대표적인 분야로, 의사결정자들이 각 대안에 대하여 선호도를 부여하고 선호도에 대한 합을 이용하여 거리척도를 최소화하는 BK method (Borda-Kendall method)와 대안간 선호도 평균점 (average point)을 이용하여 대안별 거리편차를 최소화하는 MV method (Minimum Variance method)로 구분할 수 있다. 거리척도최소화 방법은 여러 기준들을 구분해서 취급하지 않고 다수의 기준들을 함축적으로 고려해서 평가한 선호도 평점을 이용하고 있으며, 특히 의사결정자가 각 대안에 대해 평가점수나 등수를 매겨야 하는 단점이 있다. Xanthopulos et al. (2000)은 이와 같은 단점을 보완하기 위해 의사결정자가 각 대안에 대한 등수를 매길 필요 없이 각자 가장 선호하는 해만을 선택하고 이들 중 하나를 선택하는 다기준 그룹 의사결정기법을 제안하였다.

본 연구에서는 최근 개발된 PDA모형인 HSPDA모형(Baek et al., 2010)을 이용하여 상수도관망 시스템의 비정상운영상태를 모의하고, PDA모형의 장점을 활용하기 위해 산정된 수량과 수압을 동시에 고려할 수 있는 상수관망시스템의 신뢰성 분석기법을 제안하고자 한다. 단위의 차원이 달라 1대1 대응의 비교가 불가능한 수량과 수압을 Xanthopulos et al. (2000)가 제안한 Utopian Approach의 개념을 도입한 거리척도방법(DMM, Distance Measure Method)을 이용하여 하나의 신뢰도로 표현하였다. 개발된 신뢰성분석기법의 결과를 대상관망에 적용하여 기존의 연구결과와 비교하였다.

2. PDA 및 거리척도를 이용한 신뢰도 산정

2.1 HSPDA 모형

전술한 바와 같이 상수관망시스템의 수리해석은 각 절점에서의 용수수요는 항상 만족시킨다는 가정 하에 절점수두를 계산하는 DDA와 절점 수두에 따라 가능공급량과 절점수두가 결정되는 PDA로 구분할 수 있다. 두 가지 방법 모두 관망내에 존재하는 모든 절점(node)과 회로(loop)에 대하여 절점방정식과 회로방정식을 동시에 만족시킬 수 있는 관거내 유량을 결정하는 반복계산과정을 통해 수리해석을 실시하지만, DDA와 PDA의 가장 큰 차이는 수리해석에 있어서 수요절점에서 필요한 용수수요량을 고정시키는가(DDA), 혹은 절점압력에 따라 공급 가능한 용

수수요량이 변하는가(PDA)에 있다. 다만 절점압력에 따라 공급가능한 용수수요량이 변하는 PDA의 경우 절점방정식과 회로방정식을 동시에 만족시키는 해를 찾기 위해 더 많은 반복계산과정이 필요하게 된다.

하지만 관파괴 상황과 같이 비정상운영조건 분석하는 신뢰성산정시에 DDA를 사용할 경우, 실제 공급 가능한 양보다 많은 유량이 공급되는 DDA의 결과는 수두손실이 많이 발생하여 압력저하지점이 더 많이 발생하게 되고 전체 시스템의 신뢰성은 낮게 산정된다. 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) 등의 명칭으로 많은 PDA모형이 개발되었다.

이들 PDA모형은 크게 ① HOR을 이용하는 모형, ② Source Head Method를 이용하는 모형, 그리고 ③ semi-PDA의 세 가지로 구분할 수 있다. 최초 Bhave (1981)에 의해 제안된 이후 1990년대 중반까지 개발된 PDA모형들은 대부분 HOR식을 이용하는 모형들이었으나, 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.

또한 HOR 획득과 관련된 문제를 해결하기 위해 실질적인 HOR을 정의하기 위한 많은 연구가 수행되었으며 (Bhave, 1981; Goulter and Coal, 1986; Su et al., 1987; Germanopoulos, 1985; Reddy and Elango, 1989, 1991; Wagner et al., 1988; Chandapillai, 1991; Fujiwara and Ganesharajah, 1993), 계산시간을 단축하기 위해 최적화 기법을 사용한 모형 (Baek et al., 2010)과 modified Global Gradient Algorithm을 이용하여 모의시간을 획기적으로 단축시킨 모형 (Wu and Walski, 2006; Wu et al., 2006)이 제안되었다.

기존에 개발된 HOR을 이용하는 모형 중에서는 Wu and Walski (2006)와 Wu et al. (2006)의 모형이 모의효율면에서는 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 수작업으로 입력 자료에 반영하여 모의해야 하는 번거로움이 있다 (백천우 등, 2010). 따라서 본 연구에서는 모의 효율면에서 Wu and Walski (2006)와 Wu et al. (2006)의 모형과 큰 차이가 없고 source code가 공개되어, 다양한 경우의 요소파괴상황을 쉽게 모의할 수 있는 Baek et al. (2010)의 모형을 PDA분석을 위해 적용하였다.

Baek et al. (2010)은 수리해석엔진인 EPANET의 Toolkit과 발견적 탐색법의 하나인 화음탐색법 (Harmony Search, HS, Geem et al., 2001)을 연계한 HSPDA모형을 제안하였으며, 관파괴상태와 화재발생상황에 대하여 DDA 모형인 EPANET과 semi-PDA 모형 (Ozger, 2003) 및 HSPDA모형의 적용결과를 비교분석하였다. HSPDA모형의 기본 알고리즘은 Fig. 1과 같다.

절점 j의 가정된 공급량, 필요공급량, 가정수두, 최소필요수두, 설계수두를 각각 q_j^a, q_j^{req}, H_j^a, $H_j^{\min}$ 및 H_j^{des}라 하고, 절점의 특성에 따른 지수를 n이라고 정의할 때, 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.

$$\text{Adequate-flow: } q_j^a = q_j^{req}, \ \text{if} \quad H_j^a \geq H_j^{des} \tag{1}$$

Partial-flow:

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

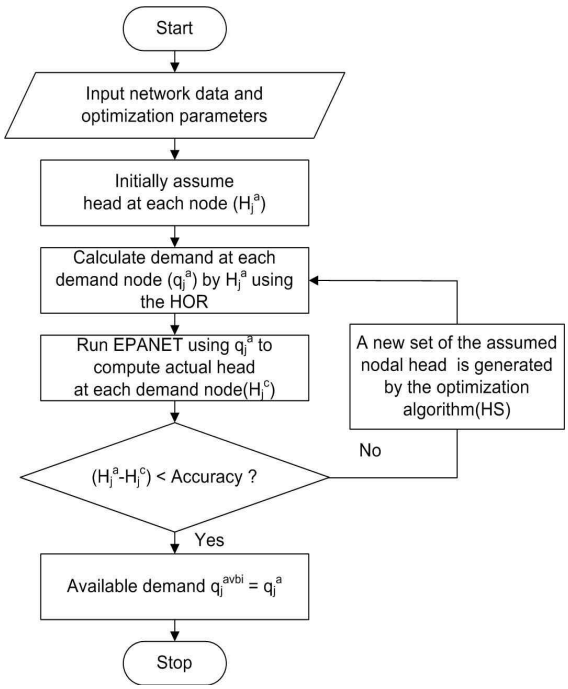

Fig. 1. Flowchart of HSPDA Model

$$\text{No-flow}: q_j^a = 0 \quad , \text{if} \quad H_j^a \leqq H_j^{\min} \tag{3}$$

최소필요수두($H_j^{\min}$)는 조금이라도 용수공급을 하기 위한 최소한의 절점수두이며, 설계수두(H_j^{des})는 절점의 필요공급량을 모두 만족시키기 위해 필요한 설계수두이다. 즉, 절점수두가 설계수두보다 클 경우 필요공급량의 공급이 가능하며(Eq. (1)), 절점수두가 설계수두보다 작고 최소필요수두보다는 클 경우 필요공급량의 일부만 공급이 가능하다(Eq. (2)). 또한 절점수두가 최소필요수두보다 작을 경우 용수공급은 불가능하다(Eq. (3)). 최소필요수두 값으로는 일반적으로 절점의 표고를 적용하며, 설계수두(H_j^{des}) 값은 최소동수압을 절점의 표고에 더하여 산정할 수 있다. 최소동수압 값으로는 15 m (Mays, 2003), 20 m (Goulter et al., 2000) 등을 사용할 수 있다. 또한 다음 Eq. (4)와 같이 절점의 용수량에 의해 설계수두를 계산하는 Chandapillai (1991)의 식을 이용하여 설계수두(H_j^{des})를 산정할 수도 있다.

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

Eq. (4)에서 R_j와 n은 절점의 특성에 따라 결정되는 상수로 수두와 유량의 단위에 따라 변하게 되며, Gupta and Bhave (1996)는 수두단위 m와 유량단위 $m^3/\min$ 시에 0.1과 2.0을 R_j와 n으로 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_j와 n값은 Gupta and Bhave (1996)가 사용한 0.1과 2.0을 사용되는 유량 및 수두 단위에 맞게 환산하여 사용하였다.

2.2 Semi-PDA 및 ADF지수

Ozger (2003) 및 Ang and Jowitt (2006)은 DDA모형인 EPANET을 이용해 수리모의를 실시하고, 정해진 최소동수압보다 낮은 절점수두가 계산되는 지점에 가상저수지를 연결하여 가상저수지로 유입되는 유량을 절점의 가능공급량으로 결정하는 semi-PDA 모형을 개발하였다. 또한 Ozger (2003) 및 Mays (2003)는 semi-PDA 모형을 이용하여 절점의 가능공급량을 계산하고 이를 이용해 상수관망을 구성하는 각 절점의 신뢰도(ADF_j)와 전체 상수관망시스템의 신뢰도(ADF_{net})을 산정하는 지수를 제안하였다. Semi-PDA모형을 이용해 계산된 절점의 가능공급량과 필요공급량을 각각 q_j^{avbl} 및 q_j^{req}이라 정의하고 상수관망시스템의 절점 수를 m이라 할 때, 각 절점의 신뢰도(ADF_j)와 전체 상수관망시스템의 신뢰도(ADF_{net})는 다음 Eqs. (5) and (6)에 의해 산정할 수 있다.

$$ADF_j = \frac{q_j^{avbl}}{q_j^{req}} \tag{5}$$

$$ADF_{net} = \frac{\sum_{j=1}^{m} q_j^{avbl}}{\sum_{j=1}^{m} q_j^{req}} \tag{6}$$

2.3 거리척도방법 기반의 신뢰성분석

의사결정을 위해 고려해야 할 결정변수가 다수 존재할 경우, 최선의 의사결정을 수립하기 위해 사용되는 대표적인 방법이 다기준의사결정 기법(MCDM, Multi Criteria Decision Making)이며, 거리척도 최소화를 이용한 그룹의 의사결정 연구는 다기준의사결정 기법의 대표적인 분야이다. 거리척도최소화 방법은 여러 기준들을 구분해서 취급하지 않고 다수의 기준들을 함축적으로 고려해서 평가한 선호도 평점을 이용하고 있으며, 특히 의사결정자가 각 대안에 대해 평가점수나 등수를 매겨야 하는 단점이 있다. Xanthopulos et al. (2000)은 이와 같은 단점을 보완하기 위해 의사결정자가 각 대안에 대한 등수를 매길 필요 없이 각자 가장 선호하는 해만을 선택하고 이들 중 하나를 선택하는 다기준 그룹 의사결정기법을 제안하였다. 이 기법은 이상점(utopian point)과의 거리를 최소화하는 utopian approach와 중위점(ideal vector)과의 대안간 거리를 최소화하는 median approach로 구분된다.

Utopian approach는 Fig. 2와 같이 의사결정자들의 선호대안들이 어느 한 영역에 집중되지 않고 제각각 넓게 분포해 있어 의사결정자들의 의견을 종합하기 어려운 경우에 적합한 접근방법이다. 각각 의사결정자들이 선택한 대안점(Decision makers's preferred alternatives or points)과 이상점(utopian point)과의 거리를 비교하여 가장 거리가 짧은 대안을 그룹의 합의안으로 채택하는 방법이다.

본 연구에서는 PDA모형의 장점을 활용하기 위해 수량과 수압을 동시에 고려하는 신뢰도 산정기법을 제안하고자 한다. 단위의 차원이 달라 1대1 대응의 비교가 불가능한 수량과 수압을 Xanthopulos et al. (2000)가 제안한 Utopian Approach의 개념을 도입한 거리척도방법(DMM, Distance Measure Method)을 이용하여 하나의 신뢰도로 표현하였다.

Fig. 3은 거리척도방법을 이용한 신뢰도 산정의 개념을 나타내고 있다. 의사결정을 위해 고려해야 할 기준이 Z_1, Z_2 두 가지이며 두 기준 모두 최대로 만족시켰을 때의 값이 각각 1이라고 하면 Fig. 3의 점 A는 두 기준 Z_1과 Z_2 모두 최

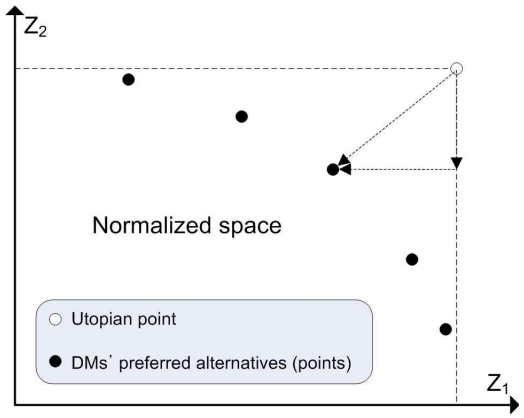

Fig. 2. Utopian Approach

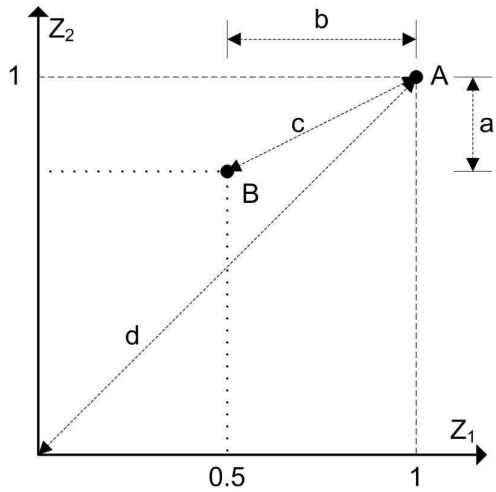

Fig. 3. Concept of MCDM Using Distance Measure Method

대로 만족한 상황을 나타내고 있으며 점 B는 Z_1은 0.5, Z_2는 0.75만큼 만족시켰을 때를 나타낸다. Utopian Approach의 개념으로는 A점은 이상점(utopian point)이 되며, B점은 대안점(Decision Makers's preferred alternatives or points)이 된다. 거리척도최소화 방법에서는 이상점과 대안점과의 거리가 최소가 되는 경우를 그룹의 합의안으로 채택하며, 이 개념을 도입한 거리척도방법에서는 Fig. 3에 나타나 있는 거리인 a, b, c 그리고 d를 이용해 서로 다른 기준인 Z_1과 Z_2의 각각의 만족도를 고려한 의사결정을 수립한다.

거리척도는 각각의 기준이 특정한 상황에 있을 때를 나타내는 점과 모든 조건을 만족시키는 점과의 거리를 의미하며, Euclidean distance ($c=\sqrt{(a^2+b^2)}$), City distance (Rectangle distance, $a+b$), 및 Tchebycheff distance (Min (a, b))는 일반적으로 많이 사용되는 거리척도이다. 본 연구에서는 가능공급량만을 고려한 *ADF*를 기반으로 Fig. 3의 Z_1과 Z_2를 각각 절점의 압력과 유량으로 설정하여, Euclidean distance를 적용한 거리척도를 이용하여 절점의 신뢰도지수 ($RDMM_i$, Reliability using DMM)를 다음 Eq. (7)과 같이 제안하였다.

$$RDMM_j = 1 - \frac{\sqrt{(1-\frac{q_j^{avbl}}{q_j^{req}})^2 + (1-\frac{p_j^{avibl}}{p_j^{des}})^2}}{\sqrt{2}} \qquad (7)$$

Eq. (7)에서 q_j^{avbl}, q_j^{req}, p_j^{avbl} 및 p_j^{des}는 각각 절점의 가능공급량, 절점의 필요공급량, 절점의 압력수두 및 절점의 설계압력수두를 의미한다. 절점의 압력수두인 p_j^{avbl}가 설계압력수두인 p_j^{des}보다 큰 경우 p_j^{des}값은 p_j^{avbl}로 적용한다. Eq. (7)은 각 절점의 신뢰도지수 산정식이며 상수관망시스템의 절점 수를 n이라 할 때, 전체 시스템의 신뢰도지수 $RDMM_{net}$은 다음 Eq. (8)로 산정할 수 있다.

$$RDMM_{net} = \frac{\sum_{j=1}^{n}(RDMM_j \times q_j^{req})}{\sum_{j=1}^{n} q_j^{req}} \qquad (8)$$

Eqs. (7) and (8)로 산정되는 절점의 신뢰도지수와 전체 시스템의 신뢰도지수는 단순히 가능공급량만을 고려한 다른 PDA모형의 신뢰도산정방법과는 달리 절점에서의 실제 수두와 가능공급량을 동시에 고려한 식이다. 또한 여기서 중요한 사항은, 산정된 *RDMM* 지수를 이용하여 이상적인 상수관망시스템(Ideal WDS)을 정의 할 수 있다는 것이다. 어떤 관이 깨져도 전체 관망에 대하여 수량과 압력을 고려한 용수공급에 문제가 없는 관망의 경우 *RDMM* 지수 값이 1.0이 되며, 이러한 관망을 이상적인 상수관망이라고 정의할 수 있다. 그리고 특정관망의 *RDMM* 지수 값과 이상적인 상수관망의 *RDMM*값과 비교할 경우 대상관망의 신뢰 수준을 정량화 할 수 있게 된다.

3. 적용 및 결과

3.1 소규모관망에의 적용

거리척도방법에 의한 신뢰도 산정 기법을 소규모 상수관망(Sample Network #1, Fig. 4)에 적용하여 신뢰도 분석을 실시하였다. 적용된 관망은 ADF 지수의 적용성을 검토하기 위해 Mays (2003) 및 백천우 등(2010)이 사용한 관망으로, 2개의 저수지, 13개의 절점, 및 21개의 파이프로 구성되어 있다. Table 1과 Table 2에는 각 절점과 파

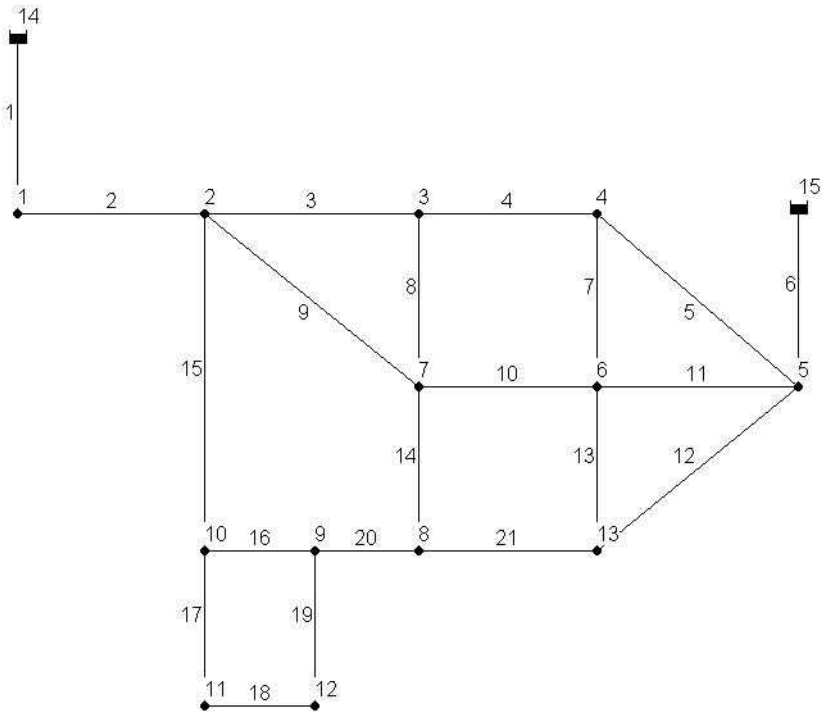

Fig. 4. Sample Network #1

Table 1. Node Characteristics(Sample Network #1)

Node ID	Elevation (m)	Demand (m^3/hr)	Node ID	Elevation (m)	Demand (m^3/hr)	Node ID	Elevation (m)	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 Coefficient	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

이프의 제원이 나타나 있다.

HSPDA모형에서 사용되는 화음탐색법의 주요인자 값인 HMCR, PAR 및 HMS값으로는 각각 0.8, 0.2 및 50을 적용하였고, 최대반복계산 횟수는 1,000회, 모든 절점에서의 가정수두와 계산수두의 차가 0.01 m이내인 경우 최적해 탐색을 마치는 것으로 종결조건을 설정하였다. 또한 절점의 가능공급량을 계산하는 Eq. (2)의 계수 n은 2.0을 적용하였다. 대상 상수관망시스템내 관거파괴상황에 대한 ADF지수와 $RDMM$ 지수를 산정하였으며, 신뢰도지수 산정 결과는 다음 Table 3과 같다. Table 3의 결과를 살펴보면, 평시유량이 1,212 m^3/hr인 Pipe 3이 파괴될 경우, semi-PDA 모형과 HSPDA 모형을 이용해 산정된 전체 시스템의 가능공급량은 각각 2,391 m^3/hr와 2,750 m^3/hr이며, 가능공급량을 이용해 계산되는 ADF 지수는 각각 0.7598과 0.8739로 산정되었다. 또한 본 연구에서 제안한 $RDMM$ 지수 값은 0.8138로 산정되었으며, 단순히 가능공급량만을 이용해 산정된 ADF 지수 값인 0.8739보다 6%가량 낮은 신뢰도 값을 나타내고 있다.

한편 총 21개의 관거에 대한 파괴상황 시 전체시스템의 가능공급량은 HSPDA모형의 결과가 semi-PDA의 결과보다 높게 산정되었으며, 따라서 절점에서의 가능공급량만을 신뢰도 산정에 사용하는 ADF_{net} 값은 HSPDA가 semi-PDA보다 높게 산정되었다. 가능공급량을 이용해 산정한 ADF_{net} ((5) in Table 3)와 $RDMM_{net}$ ((6) in Table 3)의 결과를 살펴보면 $RDMM_{net}$를 사용한 신뢰도지수 값이 낮게 산정되었다. ADF_{net}는 절점에서의 가능공급량만을 사용하고 $RDMM_{net}$는 가능공급량과 절점의 압력을 동시에 사용하므로 이와 같은 결과는 당연하다고 판단된다. 낮은 압력으로 용수가 공급될 때 사용자는 불편함을 느낄 것이며 이와 같은 사항을 반영한 $RDMM_{net}$를 이용하면 보

Table 3. Comparison between Network ADFs and RDMMs Resulting from Single Pipe Breaks (Sample Nework #1)

Pipe ID	(1) Flows under Normal Condition (m^3/hr)	$\sum q^{avbl}$ (m^3/hr)		ADF_{net}		(6) $RDMM_{net}$ (HSPDA)	(7) ADF_{net} (HSPDA)-$RDMM_{net}$ (=(5)-(6))
		(2) semi-PDA	(3) HSPDA	(4) semi-PDA	(5) HSPDA		
1	2253.29	1233.81	1637.36	0.3921	0.5204	0.3993	0.1211
2	2253.29	1233.81	1637.25	0.3921	0.5204	0.3994	0.1210
3	1211.87	2390.72	2749.60	0.7598	0.8739	0.8138	0.0601
4	791.11	2825.85	3006.80	0.8981	0.9556	0.9323	0.0233
5	66.39	3102.57	3136.58	0.9861	0.9969	0.9952	0.0017
6	893.11	1309.00	2991.56	0.4160	0.9508	0.9259	0.0249
7	216.71	3097.30	3134.68	0.9844	0.9963	0.9943	0.0020
8	208.35	3095.90	3134.19	0.9839	0.9961	0.9941	0.0020
9	545.17	2846.44	3002.19	0.9047	0.9542	0.9299	0.0243
10	37.02	3103.72	3136.88	0.9864	0.9970	0.9953	0.0017
11	304.41	3062.98	3121.77	0.9735	0.9922	0.9878	0.0044
12	309.91	3039.12	3115.85	0.9659	0.9903	0.9851	0.0052
13	125.86	3103.00	3136.73	0.9862	0.9969	0.9953	0.0016
14	75.70	3092.60	3132.73	0.9829	0.9957	0.9933	0.0024
15	283.86	2930.40	3007.53	0.9314	0.9559	0.9444	0.0115
16	164.80	3038.40	3119.12	0.9657	0.9913	0.9875	0.0038
17	119.06	3027.60	3077.86	0.9622	0.9782	0.9703	0.0079
18	11.06	3108.48	3136.40	0.9879	0.9968	0.9951	0.0017
19	96.94	3046.67	3089.72	0.9683	0.9820	0.9755	0.0065
20	67.86	3145.15	3146.15	0.9996	0.9999	0.9999	0.0000
21	184.04	3015.84	3099.37	0.9585	0.9851	0.9772	0.0079

다 현실적인 신뢰성 분석이 가능할 것이다.

3.2 대규모관망에의 적용

Ozger (2003)는 semi-PDA모형을 EPANET의 설치프로그램에 포함된 샘플 네트워크인 Net3 network (Fig, 5, Sample Network #2)에 적용하여 신뢰도를 산정하였으며, 백천우 등 (2010)은 동일 상수관망시스템에 대한 ADF값을 HSPDA모형을 이용하여 산정하였다. 본 연구에서는 거리척도방법에 의한 신뢰도 산정 기법을 대규모 상수관망인 Sample Network #2에 적용하여 신뢰도 분석을 실시하였다. Sample Network #2는 2개의 저수지, 3개의 탱크, 2개의 펌프, 92개의 절점 및 117개의 파이프로 구성되어 있다. HSPDA모형에서 사용되는 주요인자 값으로 0.8, 0.2 및 50을 각각 HMCR, PAR 및 HMS 값으로 적용하였고, 최대반복계산 횟수는 1,000회, 모든 절점에서의 가정수두와 계산수두의 차가 1.5 cm (0.05 ft)보다 작을 경우 탐색을 종료하는 종결조건을 적용하였다. 각 절점의 표고를 $H_j^{\min}$ 값으로 적용하였고 H_j^{des} 값은 최소동수압 값을 절점의 표고에 더하여 계산하였다. 최소동수압은 Ozger (2003)의 연구에서와 같이 31.64 m (103.8 ft, 45 psi)을 적용하였다. Net3 network은 Extended Period Simulation을 위한 패턴자료를 사용하고 있으며, 본 연구에서는 모의기간 중에서 모든 탱크와 저수지에서 용수가 공급되는 시간 때인 11:00시의 절점 수요를 이용하여 모형을 적용하였고, 이 때 시스템에서 필요한 용수공급량은 12,219 $Gal/\min$ 이다.

전체 117개의 관거의 파괴상황에 대한 ADF_{net}와 $RDMM_{net}$를 산정하였으며, Table 4는 산정된 $RDMM_{net}$ 값이 하위 12개 관거에 해당하는 신뢰도 산정결과를 나타내고 있다. 전체 117개 관거 중 6개 (72, 51, 109, 49, 70 및 71번) 관거는 파괴 시에 95%이하의 $RDMM_{net}$ 값을 나타내고 있으며, 다른 111개의 관거는 파괴 시에도 전체시스템의 신뢰도가 95%이상 보장되는 것으로 산정되었다. 즉 파괴 시에 95% 이하의 시스템신뢰도를 나타내는 이들 6개 관거는 상수관망시스템의 효율적인 유지관리를 위해 보다 집중적인 관리가 필요한 중요한 관거로 판단할 수 있다.

한편, 72, 51 및 109번 관거는 산정된 ADF_{net}와 $RDMM_{net}$ 값에 큰 차이가 없지만, 49번과 70번 관거는 ADF_{net}와 $RDMM_{net}$ 값에 비교적 큰 차이가 나타내고 있다. 이와 같은 값이 산정된 가장 큰 이유는 Sample Network #2의 위상적 특성에서 기인한다.

Jun and Loganathan (2007)은 상수관 파괴로 인해 수원으로부터 비의도적으로 고립되는 절점을 '비의도적 구역고립 (Unintended Isolation)'이라 정의하였으며, 72, 51 및 109번 관거는 '비의도적 구역고립'을 발생시키는 관거로, 압력과는 상관없이 용수공급 경로가 차단되어 가능공급량 q^{avbl}이 0이 되는 절점을 발생시킨다. 이들 관거는 파괴 시에 전체시스템의 신뢰성을 크게 저하시키나, 신뢰성

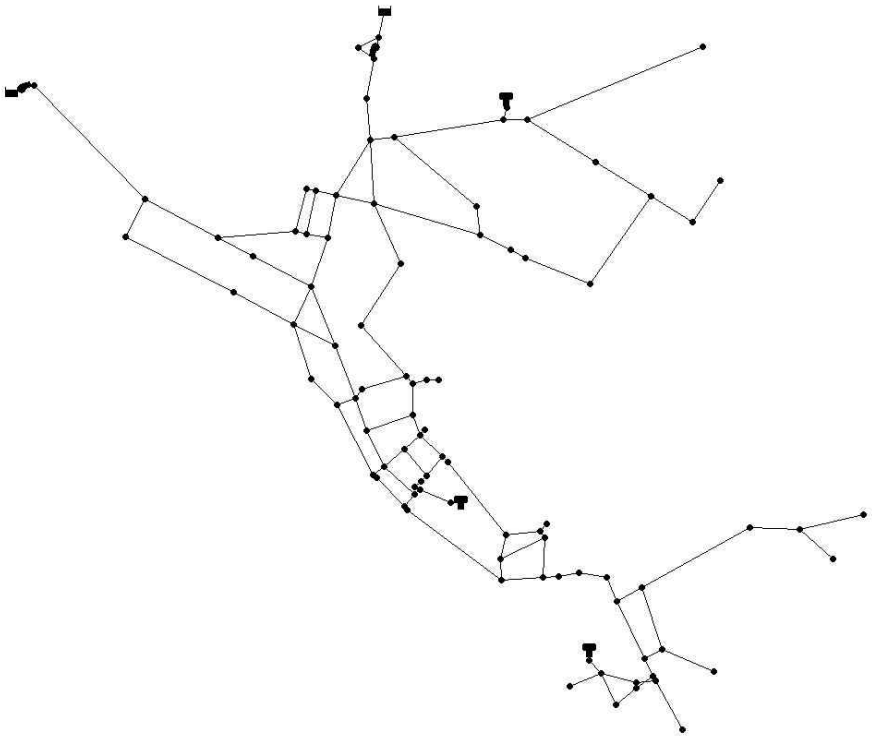

Fig. 5. Sample Network #2

Table 4. Comparison between Network ADFs and RDMMs Resulting from Single Pipe Breaks (Sample Nework #2, Lower-ranked 12 Pipes of 117)

Pipe ID	Flows under Normal Condition (Gal/min)	$\sum q^{avbl}$ (Gal/min)	ADF_{net}	$RDMM_{net}$	Pipe ID	Flows under Normal Condition (Gal/min)	$\sum q^{avbl}$ (Gal/min)	ADF_{net}	$RDMM_{net}$
72	4,613	7,604	0.6223	0.6221	30	367	11,850	0.9698	0.9695
51	1,801	10,416	0.8524	0.8522	31	360	11,857	0.9704	0.9701
109	1,358	10,416	0.8524	0.8522	81	215	12,002	0.9822	0.9819
49	4,973	11,139	0.9116	0.8712	82	105	12,112	0.9912	0.9909
70	4,973	11,138	0.9115	0.8712	97	65	12,152	0.9945	0.9942
71	4,721	11,699	0.9574	0.9355	27	51	12,166	0.9956	0.9954

이 저하되는 절점은 '비의도적 구역고립'에 포함되는 절점만 포함하며, 시스템의 수리조건도 일부에 국한되게 변화된다. 즉 이에 포함되지 않는 지역의 수리조건은 거의 변화가 없이 정상운영조건과 유사한 결과를 주게 되며 대상관망인 Sample Network #2에서는 총 117개의 관거 중 16개 (72, 51, 109, 30, 31, 81, 82, 97, 27, 83, 84, 86, 46, 91, 43, 및 44번)의 관거가 '비의도적 구역고립'을 발생시키는 관거에 해당하였다. '비의도적 구역고립'과 같이 단순히 상수도관망시스템에 위상변화만 발생하는 경우는 일반적인 DDA를 통해서도 신뢰도 산정이 가능하게 된다.

반면에, 49, 70번 관거는 대상관망의 광범위한 범위의 수리조건에 영향을 주어, 용수공급량 부족은 물론 압력저하도 유발하는 관거에 해당하며, 따라서 압력조건도 신뢰도 산정에 고려한 $RDMM_{net}$ 값이 단순히 공급량만 고려한 ADF_{net} 값보다 작게 산정된다. 또한, 평시유량이 49번과 70번관과 유사한 71번관거의 경우, 49번과 70번관에 비해 6%가량 낮은 $RDMM_{net}$ 값이 산정되고 있다. 71번 관거는 평시 유량은 49, 70번 관거와 큰 차이가 없지만, 파괴 시에 대상관망에 대해 미치는 수리적 영향이 9, 70번 관거보다 작기 때문이다. 이와 같은 결과는 압력조건을 고려하여 가능공급량을 산정하는 PDA의 특성을 잘 나타내는 결과이며, 본 연구에서 제안된 신뢰도 산정 방안이 보다 실질적이고 현실적인 신뢰성 분석을 위한 기준으로 활용될 수 있음을 나타내고 있다고 판단된다.

4. 결 론

상수관망시스템의 신뢰도분석을 위해서는 신뢰도로써 의미가 있으며 계산이 가능한 신뢰도를 정의하여야 하며, 이를 정량화하기 위한 방안을 필요로 한다. 이 논문은 상수관망시스템의 신뢰도 산정과 관련된 많은 논문에서 신뢰도산정을 위해 기준으로 사용한 공급가능수량과 압력과 관련된 사항에 초점을 맞추었다. 많은 연구에서 언급한 것과 같이 비정상운영상태하인 상수관망시스템의 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 상수관망시스템의 신뢰도를 산정할 수 있는 방안을 제시하였다. 낮은 절점압력은 낮은 사용성을 의미하며, 본 연구에서 제안한 신뢰성 분석기법은 단순히 PDA모형에 의해 산정된 가능공급수량만을 신뢰성분석에 사용한 기존의 연구와는 달리, 거리척도 방법을 이용하여 가능공급량과 압력을 동시에 고려하여 신뢰성 분석을 산정한다. 제안된 신뢰성분석기법을 소규모 및 대규모 대상관망에 적용하여 기존의 연구결과와 비교하였다.

소규모관망에 적용한 결과, 가능공급량만을 이용해 신뢰도를 산정한 ADF_{net} (Mays, 2003)를 적용하는 경우보다 낮게 신뢰도가 산정되었으며, 압력저하지점이 발생한 것을 고려할 때 보다 실질적으로 산정된 신뢰도 값으로 판단된다. 또한 제안된 신뢰도 산정기법을 대규모 관망에 적용하여 대규모관망에 대한 적용성을 검토하였다. 본 연구에서 제안된 신뢰성 산정기법은 점점에서의 실제 수두와 가능공급량을 결과로 제공하는 PDA의 장점을 효과적으로 활용하였으며, 단순히 가능공급량만을 고려한 다른 PDA모형의 신뢰성분석방법보다 현실적인 신뢰성분석이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

백천우, 전환돈, 김중훈 (2010). "HSPDA모형 및 ADF

index를 이용한 상수관망의 신뢰도 산정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제2호, pp. 201-210.

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.

Baek, C.W., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2010). "Development of a PDA model for water distribution systems using harmony search algorithm." *KSCE Journal of Civil Engineering,* KSCE, Vol. 14, No. 4, pp. 613-625.

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.

Borda, J.C. (1781) "Mémoire sur les elections au scrutinin." *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences;* English translation by A. de Grazia, Isis44 (1953), pp. 42-51.

Brans, J.P., and Vincke, Ph. (1985). "A preference ranking organisation method." *Management Science,* INFORMS, Vol. 31, No. 6, pp. 647-656.

Chandapillai, J. (1991). "Realistic simulation of water distribution system." *Journal of Transportation Engineering,* ASCE, Vol. 117, No. 2, pp. 258-263.

Charnes, A., Copper, W.W., and Rhodes, E.L. (1978). "Measuring the efficiency of decision making units." *European Journal of Operational Research,* EJOR, Vol. 2, No. 6, pp. 429-444.

Cullinane, M.J. (1986). "Hydraulic reliability evaluation of water distribution systems." *Water forum 1986: World water issues in evolution,* ASCE.

Fujiwara, O., and Ganesharajah, T. (1993). "Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks." *Water Resources Research,* AGU, Vol. 29, No. 8, pp. 2917-2924.

Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, G.V. (2001). "A new heuristic optimization technique: harmony search." *Simulation,* SCS, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68.

Germanopoulos, G. (1985). "A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models." *Civil Engineering and Environmental Systems,* Vol. 2, No. 3, pp. 171-179.

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." in Mays, L.W., *Water Distribution System Handbook,* McGraw-Hill, New York, 2000.

Gupta, R., and 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.

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.

Kaufmann, A.D., Grouchko, D., and Croun, R. (1977). *Mathematical models for the study of the reliability of systems.* Academic Press, New York, NY.

Kemeny, J.G., and Snell, L.J. (1962). *Preference ranking: An axiomatic approach.* Mathematical models in the Social Sciences, Ginn, New York, pp. 9-23.

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, New York, NY.

Ostfeld, A. (2004). "Reliability analysis of water distribution systems." *Journal of Hydroinformatics,* IWA, Vol. 6, No. 4, pp. 281-294.

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.

Reddy, L.S., and Elango, K. (1989). "Analysis of water distribution networks with head dependent outlets." *Civil Engineering and Environmental Systems,* Vol. 6, No. 3, pp. 102-110.

Reddy, L.S., and Elango, K. (1991). "A new approach to the analysis of water starved networks." *Jouranl of Indian Water Works Association,* IWWA, Vol. 23,

No. 1, pp. 31-38.

Roy, B. (1991). "The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods." *Theory and Decision,* Vol. 31, No. 1, pp. 49-73.

Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process.* McGraw-Hill, New York, NY.

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.

Tabesh, M., Tanyimboh, T.T., and Burrows, R. (2001). "Extended period reliability analysis of water distribution systems based on head driven simulation method." *Proceedings of IWA World Water Congress 2001*, IWA, Orlando, Florida, USA.

Tabesh, M., Tanyimboh, T.T., and Burrows, R. (2004). "Pressure dependent stochastic reliability analysis of water distribution networks." *Water Science and Technology: Water Supply,* IWA, Vol. 4, No. 3, pp. 81-90.

Tanyimboh, T.T., and Tabesh, M. (1997). "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., Tabesh, M., and Burrows, R. (2000). "Appraisal of source head methods for calculation reliability of water distribution networks." *Journal of Water Resources Planning and Management,* ASCE, Vol. 127, No. 4, pp. 206-213.

Wagner, J.M., Shamir, U., and Marks, D.H. (1988). "Water distribution reliability: Analytical methods." *Journal of Water Resources Planning and Management,* ASCE, Vol. 114, No. 3, pp. 253-275.

Wu, Z.Y., and Walski, M. (2006). "Pressure-dependent hydraulic modelling for water distribution systems under abnormal conditions." *Proceedings of 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." *Proceedings of 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis,* ASCE, Cincinnati, Ohio, USA.

Xanthopulos, Z., Melachrinoudis, E., and Solomon, M.M. (2000). "Interactive multiobjective group decision making with interval parameters." *Management Science,* INFORMS, Vol. 46, No. 12, pp. 1721-1732.

논문번호: 10-061	접수: 2010.07.15
수정일자: 2010.08.13/08.16	심사완료: 2010.08.16