불확실성을 고려한 상수관망 누수탐지 모형 개발 및 적용 Development and Application of Leakage Detection Model for Water Distribution Networks considering Uncertainty Analysis

유도근* · 윤정수** · 이호민*** · 강두선**** · 김종훈*****

Yoo, Do Guen*, Yoon, Jung Soo**, Lee, Ho Min***, Kang, Doosun****, and Kim, Joong Hoon*****

Abstract

The leakage management of water distribution networks is one of the significant work for supply water with efficiency and stability. This study suggests the improved leakage detection model, which includes hydraulic analysis simulator considering the uncertainties of nodal demand and pipe roughness coefficient. The nodal demand and pipe roughness coefficient are important element that contains a high degree of uncertainty when modeling networks. Here, the Emitter function of EPANET2 is used to simulate the leakage in water distribution networks. The developed model is applied to the P city network in Korea which is calibrated, and the results show the proposed model is superior to other reported models. The suggested model is proved to be efficient in detecting the location of the leakage and it can supports to leakage detection operations in real fields. Furthermore, the model also can be used to estimate the position and the number of monitoring points.

Key words : Water distribution system, Leakage detection, Emitter coefficient, Uncertainty analysis, Optimization

요 지

상수관망 시스템에서의 누수관리는 효율적이고 안정적인 물공급 측면에서 상당히 중요하다. 본 연구에서는 기존 누수탐지 모형의 문제점을 보완하여, 절점의 수요량과 관 마찰계수의 불확실성 분석을 포함하는 수리해석 시뮬레이션을 통해 개선된 누수탐지모형을 개발하였다. 상수도 관망해석 프로그램인 EPANET2의 에미터 (Emitter) 기능을 활용한 모형을 구축하였으며, 상수관망의 수리해석 시 불확실성이 큰 매개변수인 수요량과 관 마찰계수의 불확실성 분석을 통해 보다 합리적인 누수탐지를 기법을 제안하였다. 개발된 방법을 검·보정이 완료된 국내 실제 소블력 관망에 적용하였으며, 불확실성을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하여 그 결과를 서로 비교하였다. 적용 결과, 현장의 누수탐지를 실시하기 전 전처리 과정으로 본 연구에서 제안된 누수탐지모형을 적용하고 그 결과로 도출된 누수의심 지점을 바탕으로 탐지를 실행할 경우 경제적, 시간적으로 많은 효율을 보일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 제안된 방법은 누수지점 탐지를 위한 방법론 뿐 만 아니라, 효율적인 누수탐지를 위한 관측 자료의 수 및 관측 지점의 선택에 관한 연구에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : 상수관망, 누수지점탐지, 에미터 계수, 불확실성 분석, 최적화 기법

1. 서 론

상수관망 시스템에서의 누수관리는 효율적이고 안정적인

물공급 측면에서 상당히 중요하다. 특히 유수율 제고를 위해서는 적극적인 누수관리가 필수적이며, 이를 위해 누수탐지 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 누수탐지를 위한

*정회원. 고려대학교 공과대학 방재과학기술연구소 연구교수(E-mail: godqhr425@korea.ac.kr)

Member. Research Professor, Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea Univ., Seoul, Korea

**정회원. 계룡건설 사원

Member. Engineer, Kyeryong Construction, Daejeon, Korea

***정회원. 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 석박사통합과정

Member. Graduate student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., Seoul, Korea

****정회원. 경희대학교 공과대학 사회기반시스템공학과 교수

Member. Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyung Hee Univ., Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea

*****교신저자. 정회원. 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-3290-3316, Fax: +82-2-928-7656, E-mail: jaykim@korea.ac.kr)

Corresponding Author: Member. Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., Seoul, Korea

방법론은 크게 두 가지로 구분 될 수 있다. 첫째, 청음형 탐지 기술, 압력형 탐지 기술, 상관식 탐지 기술, 지하탐사 레이더 기술, 그리고 TDR(Time Domain Reflectometer), OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) 기반 기술 등과 같이 현장 탐지를 기반으로 하는 배관 누수 관리 방법이 있다. 국내의 경우 Lee *et al.*(2003)은 음향방출 및 가속도 신호를 이용한 상수도배관의 누수지점 탐지에 관한 연구를 수행한바 있으며, Kang and Hong(2004)은 누수감지관과 TDR을 이용한 원격 상수도관망 누수감지 시스템을 제안한 바 있다. 또한 Lee and Yoon(2004)은 관과 유체사이의 연성진동을 이용하여 누수위치를 식별하는 연구를 수행하였으며, Chung(2013)은 파워스펙트럼 분석을 이용한 누수탐지 모니터링 시뮬레이션을 제안한바 있다. 제안한 누수탐지 모니터링 시뮬레이션에서는 수집된 반사파 파형으로부터 변화율을 계산하고 고속 푸리에 변환을 이용한 파워스펙트럼 분석을 통해 누수의 크기와 반사파 파형의 상관관계를 평가한다. 국외의 경우 최근 Cataldo *et al.*(2012)은 TDR 기법을 적용하였고, Khulief *et al.*(2012)은 새로운 음향식 누수탐사 기법을 제시한 바 있다. 그러나 이와 같은 각 기술은 짧은 길이의 실험 배관이나 상수관망 내의 일부 구간에 제한적으로 적용한 결과를 바탕으로 성능이 평가되었고, 실제 상수관망 시스템에서의 적용성이 검증되지 않았으며, 특히 이와 같은 기술을 적용하기 위해서는 상대적으로 많은 비용이 소요된다는 단점을 지닌다. 두 번째 방법론은 수리해석을 기반으로 한 누수탐지 기법이다. 국내의 경우 Lee *et al.*(2000), Park *et al.*(2003), Park *et al.*(2004), 그리고 Song (2008)이 상수관망 배수라인에서 측정된 압력과 유량자료를 이용하여 관망을 수리학적으로 보정한 후, 이 자료를 바탕으로 특성선 방법을 이용한 역산기법, 부정류 관망 해석, 그리고 최적화 기법을 사용한 수리학적 누수탐지 기법을 제안하고 각 기법의 결과를 비교 분석한 바 있다. 그러나 이와 같은 국내의 연구들은 부정류 해석과 특성선 방법의 해석을 위주로 수행됨에 따라 풀이과정이 상당히 복잡하고, 단일관 해석에도 상당한 시간이 소요되어 실제 관망에서의 적용성이 떨어지는 단점을 가진다. 이를 보완하기 위해서 Yoon *et al.*(2012)은 기존 누수탐지 모델의 문제점을 보완할 수 있는 수리해석 시뮬레이션과 최적화 기법을 결합한 최적누수탐지 기법을 제안한 바 있다. 이 연구에서는 상수도 관망해석 프로그램인 EPANET2(EPA, 2000)의 에미터(Emitter) 기능을 활용한 수리해석 모형을 구축하였으며, 에미터 계수(Emitter Coefficient)의 최적화를 통해 누수위치를 결정하였다. 국외의 경우 Covas and Ramos(2010)는 역부정류 해석을 통해 누수 지점을 탐지하는 방법론을 상대적으로 큰 시험관망에 적용하여, 누수탐지 효율과 그 결과의 불확실성을 제시하였다. Ye and Fenner(2011)와 Oliveira *et al.*(2011)은 상수관망에서 측정된 파손자료, 압력, 그리고 유량 등의 자료들의 경향성을 살펴보고, 칼만필터링(Kalman Filtering)과 공간스캐통계량

(Spatial Scan Statistics) 방법을 각각 이용하여 관 파괴의 패턴과 위치를 결정하는 연구를 수행하였다. Islam *et al.*(2001)은 수리해석 결과로 나타나는 압력과 유량의 값과 관경, 관 길이 등의 물리적 제원의 값을 퍼지 함수화 한 후 이를 모두 고려하여 Index of Leakage Propensity(ILP)라고 하는 인자를 개발하였으며, 이 값을 통하여 누수지점을 판단하였다. 또한 Lijuan *et al.*(2012)은 실제 압력 측정 자료와 계산된 압력의 차가 최소화 되는 각 절점의 수요량을 유전알고리즘(Genetic Algorithms)을 통하여 결정하고, EPANET2 수리해석 시 해당 수요량에 누수량이 포함되었음 가정하여 실제 수요량을 제외한 나머지 양을 해당 지점의 누수량으로 판단하고, 그 크기가 큰 지점을 누수지점으로 결정하는 기법을 개발하였다.

그러나 위와 같은 수리해석 기반의 누수탐지 기법은, 수리해석에 사용되는 입력 자료와 수리해석 결과로 나타나는 절점의 압력과 관로의 유량이 정확하다는 전제로 수행된다. 즉, 수리해석 과정에서의 불확실성이 고려되지 않는 경우, 수리해석 시 사용되는 입력 자료가 정확하지 않다면 해당 기법의 결과로 나타나는 누수지점도 정확하지 않을 수 있다. 따라서 수리해석 기반의 누수탐지를 위해서는 수리해석 과정에 사용되는 인자의 불확실성이 반드시 고려되어야 한다. 상수관망 수리해석에서는 여러 인자 중 절점의 수요량과 관 마찰계수의 값에 의해 절점에서의 압력과 관의 유량값의 변동성이 상당히 크게 나타나는 것으로 알려져 있다(Giustolisi *et al.*, 2009; Kang and Lansey, 2010). 최근에는 누수탐지 기법 외에 상수관망 내의 불확실성을 가진 변수를 샘플링 기법을 이용하여 모의하는 연구가 진행되고 있다. Bebayan *et al.*(2005)은 몬테카를로(Monte Carlo) 기법에 의한 샘플링으로 수요량의 불확실성을 고려한 수리해석을 제안하고 이를 상수관망의 최소 비용 단목적 최적설계에 활용하였다. Kapelan *et al.*(2005)은 Bebayan *et al.*(2005)의 연구를 확장하여 상수관망의 수요량과 관 마찰계수의 불확실성을 고려한 다목적 최적설계를 시도하였으며, 불확실성 분석을 위해 라틴하이퍼큐브(Latin Hypercube) 샘플링 기법을 사용하였다. 다목적 최적설계의 인자로는 최소비용과 강건성(Robustness)을 적용하였다. 국내에서는 Jung *et al.*(2010)이 관망 절점에서의 수요량과 관의 마찰계수를 불확실성을 가진 변수로 두고, 비용 최소화와 관망의 강건성을 최대화 하는 두 가지 목적함수를 가진 다목적 함수 최적화 문제를 다루었다. 최적화 과정은 비용최소화와 불확실성을 고려한 최종 최적화의 두 과정으로 구분된다. 국외의 연구와는 달리 각 절점에서의 수요량과 관의 조도계수는 베타확률밀도함수(Beta PDF)를 사용하였으며, 라틴하이퍼큐브 샘플링 방법으로 불확실성을 고려하였고, 최적화 기법으로는 다목적 유전알고리즘(Multi-objective Genetic Algorithms, MOGA)을 적용하였다.

본 연구에서는 기존 누수탐지 모델의 문제점을 보완하여, 수리해석 시뮬레이션과 절점의 수요량, 관 마찰계수의 불확실

성분석을 통해 개선된 누수탐지모형을 개발하였다. 상수도 관망해석 프로그램인 EPANET2의 에미터(Emitter) 기능을 활용한 수리해석 모형을 구축하였으며, 상수도관망의 수리해석 시 불확실성이 큰 매개변수인 수요량과 관 마찰계수의 불확실성 분석을 통해 보다 합리적인 누수탐지 기법을 제안하였다.

2. 불확실성을 고려한 상수도관망 누수탐지 모형

2.1 목적함수

본 연구에서는 관측된 절점 수압 및 관로의 유량 값과 모의된 수압 및 유량자료의 차이가 최소가 되도록 하는 목적함수를 설정하였으며, 이는 식 (1)과 같이 정의 될 수 있고, 목적함수는 식 (2) 및 식 (3)에서 제시된 제약조건과 같이 결정변수인 에미터 계수와 절점의 압력이 음의 값을 가지지 않을 경우에만 유효하다.

$$\text{Minimize } F(X) \quad (1)$$

Subject to

$$C_i \geq 0 \quad (2)$$

$$H_i > 0 \quad (3)$$

여기서, $F(X)$ 는 목적함수, C_i 는 i 절점의 에미터 계수, H_i 는 i 절점의 압력이다.

$$F(X) = \frac{\sum_{n=1}^{NH} w_n \left[\frac{Hs_n - Ho_n}{Ho_n} \right]^2 + \sum_{n=1}^{NQ} w_n \left[\frac{Qs_n - Qo_n}{Qo_n} \right]^2}{NH + NQ} \quad (4)$$

$$F(X) = \sum_{t=1}^T \frac{\sum_{n=1}^{NH} w_n \left[\frac{Hs_n(t) - Ho_n(t)}{Ho_n(t)} \right]^2 + \sum_{n=1}^{NQ} w_n \left[\frac{Qs_n(t) - Qo_n(t)}{Qo_n(t)} \right]^2}{NH + NQ} \quad (5)$$

여기서, Ho_n 는 관측된 n 번째 절점의 수두, Hs_n 는 모의된 n 번째 절점의 수두, Qo_n 는 관측된 n 번째 관로의 유량, Qs_n 는 모의된 n 번째 관로의 유량, NH 는 관측된 수두의 수, NQ 는 관측된 유량의 수, w_n , w_n 는 식 (6)과 (7)에 보인 바와 같이 각각의 수두와 유량의 관측을 위한 가중치이다. 식 (4)의 경우는 불확실성 분석을 적용하지 않았을 때의 목적함수이다. 식 (5)의 경우는 불확실성 분석을 적용하였을 때의 목적함수이다. 식 (4)는 불확실성 고려 전후의 결과를 비교하기 위해서 사용된다.

$$w_n = Hloss / \sum Hloss_n \quad (6)$$

$$w_n = Qo_n / \sum Qo_n \quad (7)$$

여기서, $Hloss_n$ 는 n 지점에서의 관측된 수두손실이다.

2.2 불확실성 분석

실제 상수도관망 시스템은 각 절점마다 수요량의 변동성이 크고, 지하에 매설된 관로의 관 마찰계수를 정확히 산정하는

것에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 상수도관망 수리해석 시 절점수요량과 관 마찰계수 값의 불확실성을 정량화하고 최적누수위치 탐지를 수행하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하였다. 몬테카를로 시뮬레이션은 모형 및 매개변수의 불확실성 분석을 목적으로 많이 이용되는 통계학적 모의기법이다. 이 기법은 확률분포에 따라 발생하는 무작위 변수를 이용하여 반복되는 모의수행 처리기법이다(Ang and Tang, 1984). 또한 적용자료의 통계학적 특성을 고려한다는 장점을 가지고 있다. 수요량의 불확실성을 고려하기 위해 표준 정규분포의 95% 신뢰구간 범위에서 각각 1,000회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였으며, 표준 정규분포의 95% 신뢰구간을 구하기 위해 변동계수($C_v = \sigma/\mu$)값은 0.05를 사용하였다(Kang and Lansey, 2010). 관 마찰계수의 경우 표준 정규분포의 95% 신뢰구간을 구하기 위해 변동계수($C_v = \sigma/\mu$) 0.1을 사용하였다(Kang and Lansey, 2010).

2.3 화음탐색법

본 연구에서는 누수위치 탐지를 위한 최적화기법으로 국내에서 처음 개발된 메타휴리스틱 기법 중의 하나인 화음탐색법(Harmony Search, HS)을 적용하였다. 화음탐색법은 음악 합주에서 각 악기의 연주자들이 모여 최적의 화음을 만들어 내기 위해서 연습을 하며 보다 더 좋은 화음을 만들어 내는 과정을 알고리즘으로 구현한 것으로 Geem et al.(2001)에 의하여 처음 제안되었다. Geem et al.(2001)에 의하면, 화음탐색법은 가능해들의 모임인 Harmony Memory(HM)로 구성되며 HMC(R)(Harmony Memory Considering Rate)과 PAR(Pitch Adjusting Rate)이라는 매개변수를 이용하여 최적의 해를 탐색한다. Harmony Memory(HM)은 화음탐색법에서는 새로운 해를 생성할 때 HMC(R)에 의해 HM에 저장된 해들을 고려할 수 있다. 유전자 알고리즘이 선택에 의해 짝수 개수의 해를 선택하여 다음세대를 위해 교배, 변이를 시키듯 화음탐색법에서는 새로운 해를 생성할 때 HM을 고려할 수도 있다. HS를 통한 최적화 과정은 그림 1과 같다.

2.4 모형의 구성

본 모형에서는 우선 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 수요량과 관 마찰계수의 불확실성 분석을 하여 샘플링된 자료를 생성한다. 수요량, 관 마찰계수의 불확실성 분석 후 최적 누수위치를 결정한다. 최적 누수위치를 탐지하기 위하여 상수도관망 내에서 관측된 절점 수압과 관로의 유량자료를 Semi-PDA 수리해석(Yoon et al., 2012)기반으로 모의된 절점의 수압과 관로의 유량자료와 비교하여 그 차이가 최소화되는 최적화된 에미터 계수 값을 화음탐색법을 통하여 결정한다. 개발된 모형은 크게 그림 2에 나타난 것과 같이 메인프로세스(Main Process)와 서브모듈(Sub Module)로 구성된다. 메인프로세스는 절점의 수요량과 관 마찰계수의 불확실성을 고려하여 화

Fig. 1. Flowchart of Harmony Search.

Fig. 2. Flowchart for Proposed Optimal Leakage Detection Model.

음탐색법을 통한 최적 누수탐지를 수행하는 전반적인 절차를 나타내며, 서브모듈은 Semi-PDA 분석과 화음탐색법을 통한 에미터계수를 최적화하고 누수 지점을 결정하는 상세한 과정을 나타낸다. 본 연구에서는 프로그래밍 언어로 비주얼베이직 (Visual Basic)을, 계산 엔진으로 EPANET DLL Toolkit을 사용하였다. 또한 메인프로세스에서는 불확실성을 고려하지 않는 경우의 모의 과정도 제시되어 있다.

Semi-PDA(Yoon *et al.*, 2012)을 누수해석에 적용하기 위해 EPANET2 매개변수중의 하나인 에미터 계수를 이용하여 최적누수지점탐지 시뮬레이션을 프로그램화한다. 에미터는 절

점에서 오리피스나 노즐 등을 통해 유출되는 양을 계산하는 방류장치를 의미한다. 따라서 에미터에 의해 절점의 방류량은 식 (8)과 같이 결정될 수 있다. 에미터 계수는 절점의 압력과 방류량에 따라 변하게 되므로, 에미터 기능을 통하여 누수로 인한 압력과 유량의 변동을 알 수 있게 된다. 또한 절점 사이에 연결되는 관로에서의 누수 모의에 적용될 수 있다. 다시 말해서 식 (8)의 관계에 의하여 에미터 계수 C 의 값이 클수록 누수량은 커지게 되고, 반대로 C 의 값이 작을수록 누수량은 작아지게 되므로 에미터 계수의 값에 의하여 절점의 누수정도를 예측할 수 있다. 그러므로 상수관망 시스템에 누수가 발

생하게 되면 절점 에미터 계수 값의 결정에 따라 누수위치를 판단할 수 있다.

$$q=Cp^r \quad (8)$$

여기서, q 는 절점의 방류량, p 는 절점의 압력, C 는 에미터 계수, r 은 에미터 지수이며 일반적으로 0.5의 값을 사용한다.

3. 적용성 평가 및 불확실성 분석

3.1 적용관망

본 연구에서 제시한 모형을 P시의 8블록 배수구역에 적용하였다. 적용된 배수관망은 면적이 27.13 km²이고 1,150세대로 구성되어있다. 적용 관망인 P시의 관망은 관망해석상 25

Fig. 3. Target Network (P city).

Table 1. Pipes Information

Link ID	Length (m)	Diameter (mm)	Roughness	Link ID	Length (m)	Diameter (mm)	Roughness
P-1	5.4	200	110	P-19	222.7	200	110
P-2	376.8	200	110	P-20	117.8	200	110
P-3	142.5	200	110	P-21	145	200	110
P-4	163	200	110	P-22	118	200	110
P-5	224.1	200	110	P-23	163.4	200	110
P-6	293.1	200	110	P-24	195.2	200	110
P-7	71.3	200	110	P-25	163.3	200	110
P-8	123.5	200	110	P-26	144.5	200	110
P-9	172	200	110	P-27	197.9	200	110
P-10	226.2	200	110	P-28	247.9	200	110
P-11	106.2	200	110	P-29	179.8	200	110
P-12	178.8	200	110	P-30	327.5	200	110
P-13	86.8	200	110	P-31	277.5	200	110
P-14	118.1	200	110	P-32	306.7	200	110
P-15	259.1	200	110	P-33	349.7	200	110
P-16	163	200	110	P-34	222.4	200	110
P-17	145.4	200	110	P-35	355.6	200	110
P-18	221.6	200	110	P-36	233.2	200	110

Table 2. Nodes Information

Node ID	Demand (CMH)	Elevation (m)	Node ID	Demand (CMH)	Elevation (m)
J-1	10.34	13.1	J-14	5.26	12.34
J-2	1.21	12.42	J-15	7.19	12.73
J-3	2.32	12.16	J-16	1.39	13.02
J-4	1.13	12.19	J-17	1.52	12.45
J-5	3.61	10.91	J-18	2.94	13.23
J-6	0	14.32	J-19	10.5	13.26
J-7	0	11	J-20	11.7	13.33
J-8	6.1	14.01	J-21	9.18	19.51
J-9	6.41	10.84	J-22	0	16.07
J-10	2.47	14.91	J-23	0	12.88
J-11	2.46	13.62	J-24	0	13.54
J-12	1.55	12.89	J-25	0	13.58
J-13	2.67	12.42	Re-1	-89.96	50

개의 절점과 36개의 관로, 1개의 저수지로 구성되어 있다. 제시된 관망은 그림 3에 나타낸바와 같이 구성되어 있으며, 해당 블록에 대한 관로와 절점의 제원은 표 1과 표 2에 제시되어 있다.

3.2 적용 시나리오 및 분석 결과

적용된 관망의 수압 및 유량 관측지점은 그림 4에서 보는 바와 같다. J-5, J-12, J-14, J-19, 그리고 J-24에서는 수압을 측정하였으며, P-1과 P-30에서는 유량자료를 관측하였으며, 그 결과를 바탕으로 누수지점 최적화를 실시하였다. 본 네트워크에서 발생한 실제 누수지점은 그림 4에서 나타난 바와 같이 J-13, J-15, J-16, 그리고 J-17 지점이다. 일반적으로 수리해석을 통한 누수탐지에서는 주간 측정 자료를 사용할 경우 누수탐지가 어려운 것으로 알려져 있어, 본 연구에서는 주간과 야간으로 구분하여 누수지점 최적화를 수행하였다. 주간 및 야간의 수압과 유량 관측데이터는 표 3과 표 4와 같다.

본 연구에서는 누수지점 최적화 기법을 수리학적 인자인 절점 수요량과 관 마찰계수의 불확실성을 고려하지 않은 경우 (Case 1)와 불확실성을 고려한 경우(Case 2-1, 2-2, 그리고 2-3)로 구분하여 적용하였으며, 그 결과를 비교 분석하였다.

Fig. 4. Leakage Locations and Monitoring Points.

Table 3. Observed Data (In the daytime)

Node ID	Pressure (m)	Pipe ID	Flow (CHM)
J-5	36.11	P-1	203.38
J-12	34.18	P-30	77.97
J-14	34.76		
J-19	33.83		
J-24	33.71		

Table 4. Observed Data (At night)

Node ID	Pressure (m)	Pipe ID	Flow (CHM)
J-5	38.03	P-1	114.06
J-12	36.07	P-30	43.7
J-14	36.63		
J-19	35.71		
J-24	35.49		

3.2.1 불확실성 고려하지 않은 경우(Case 1)

우선 불확실성을 고려하지 않고 최적 누수탐지 모형을 수행한 결과는 그림 5와 같다. 그림 5는 최적 누수해석결과로 나타난 각 절점의 에미터 계수의 값을 나타낸다. 에미터 계수의 값이 클수록 누수의 가능성이 높아지는 것을 의미한다. 우선 주간과 야간 측정자료를 대상으로한 누수탐지 결과를 비교해 보면, 주간의 경우 실제 누수지점(J-13, J-15, J-16, 그리고 J-17)의 에미터 계수가 다른 절점에 비해 높게 나타나는 것을 확인할 수 있어, 이 결과를 바탕으로 누수탐지모형의 적용성을 확인할 수 있다. 그러나 실제 누수지점 이외의 절점인 J-14와 J-23의 경우 J-13과 J-16의 에미터 계수 값보다도 같거나 높게 나와 누수확률이 높은 네 개의 절점을 우선 탐사지점으로 확정할 경우 정확한 누수탐지가 불가능할 수 있음을 확인하였다. 이것은 주간의 수요량을 기준으로 최적누수 모형을 수행할 경우, 발생한 유출량이 누수에 의한 유출인지 수요에 의한 유출량인지 정확히 판단할 수 없기 때문이다. 이와는 반대로 야간 수요량을 기준으로 최적누수탐지 모형을 수행한

Fig. 5. Result of Optimal Emitter Coefficients - Case 1.

Table 5. Result of Leakage Location - Case 1 (At night)

Node	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9
Emitter coefficient	0	0	0.1	0.3	0	0	0	0	0
Leakage spot									
Node	J-10	J-11	J-12	J-13	J-14	J-15	J-16	J-17	J-18
Emitter coefficient	0	0	0	0.8	0	1	0.9	1	0.2
Leakage spot				●		●	●	●	
Node	J-19	J-20	J-21	J-22	J-23	J-24	J-25		
Emitter coefficient	0	0	0	0	0.1	0	0		
Leakage spot									

지점 네 지점 모두 누수예측 지점과 정확하게 일치하는 것으로 나타났다. 에미터 계수의 경우, 표 5에서 보는 바와 같이 에미터 값의 수치가 다른 절점보다 크게 나타나, J-13, J-15, J-16, J-17에서 누수가 발생한다고 예측하였다. 그러므로 본 모형을 적용할 경우 야간최소유량을 기준으로 모형을 구성한다면, 주간 수요량을 기준으로 모형을 적용했을 때 보다 효과적인 누수탐지가 가능 한 것을 알 수 있다. 그러나 본 방법이 적용된 관망의 경우 수리학적 인자들이 정확하게 검 · 보정되었다는 것을 전제로 최적누수탐지 모형이 적용되므로, 그 결과의 정확도가 상대적으로 높게 나올 수밖에 없다. 실제 온라인 감시시스템의 경우, 실시간 관망해석의 정확도가 높지 않으므로 누수탐지 모형을 통해 정확한 누수지점을 찾는 것 보다는 수리학적 불확실성을 고려하여 누수 확률이 높은 누수

의심 지점을 적절히 찾는 것이 우선되어야 한다.

3.2.2 불확실성 고려한 경우(Case 2-1, 2-2, 2-3)

관망 수리해석의 불확실성을 고려하고 최적 누수탐지 모형을 수행하기 위해서 본 연구에서는 다음과 같이 세 가지 경우를 적용하였다. 앞서 불확실성을 고려하지 않은 경우 상대적으로 효율적인 누수탐사가 가능하였던 야간 수요량 및 측정 자료를 기반으로 각 Case 별 최적 누수 모형을 수행하였다.

- 관 마찰계수를 불확실성 인자로 분석한 경우(Case 2-1)
- 절점 수요량을 불확실성 인자로 분석한 경우(Case 2-2)
- 관 마찰계수와 절점 수요량 모두를 불확실성 인자로 분석한 경우(Case 2-3)

그림 6~8은 불확실성을 고려한 경우(Case 2-1, 2-2, 그리고

Fig. 6. Result of Optimal Emitter Coefficients - Case 2-1.

Fig. 7. Result of Optimal Emitter Coefficients - Case 2-2.

Fig. 8. Result of Optimal Emitter Coefficients - Case 2-3.

2-3)의 결과를 나타내고 있다. 우선 관 마찰계수의 불확실성을 고려하여 제안된 모형을 적용한 결과 누수가 발생하는 J-13, J-15, J-16, J-17의 에미터 계수의 값이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 하지만 주목할 점은 관 마찰계수의 불확실성을 고려한 결과 불확실성을 고려하지 않은 결과와 비교해, J-9에서의 에미터 계수 값이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 수요량의 불확실성을 고려하여 제안된 모형에 적용한 결과도 관 마찰계수만을 불확실성 분석한 경우와 마찬가지로 누수가 발생하는 J-13, J-15, J-16, J-17 모두 누수탐지가 가능한 것으로 나타난다. 하지만 J-4와 J-9 지점에서 누수발생 가능성이 있음을 뜻하는 에미터 계수 값이 증가하는 결과가 나타났다.

관 마찰계수와 절점 수요량을 동시에 불확실성 인자로 고려하여 제안된 최적누수탐지모형에 적용한 결과 관 마찰계수와 수요량만을 불확실성 분석한 경우와 마찬가지로 누수가 발생하는 J-13, J-15, J-16, J-17 모두 누수탐지가 가능하였다. 그러나 불확실성을 고려하기 전에 비해 J-4와 J-9지점의 경우 에미터 계수 값이 크게 증가하였으며, 수요량만을 불확실성 분석한 경우와 비교하였을 경우에도 에미터 계수의 값이 증가한 것을 확인할 수 있다.

본 적용 결과를 종합해 보면, 수리학적 불확실성을 고려하여 최적누수탐지를 적용할 경우 누수지점의 탐지는 가능하지만 불확실성을 고려하지 않는 경우에 비해 최적 에미터 계수의 값이 실제누수지점이 아닌 곳에서도 상대적으로 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 수리해석을 위한 자료의 검 · 보정이 정확히 이루어진 관망의 경우 불확실성을 고려할 경우 오히려 최적의 누수지점 탐지의 효율성이 떨어질 수 있음을 의미한다. 그러나 대부분의 경우 본 적용 예와는 다르게 수리해석의 입력자료와 실제 관측자료는 불확실성을 가진다. 이 경우 불확실성을 고려한 누수지점 탐지모형을 적용할 경우, 그 결과는 전체 관망에서 누수가 의심되는 지점을 우선적으로 선별하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 만약 불확실성이 내포된 수리해석 관망에서 이를 고려하지 않고 누수지점 탐지를 수행할 경우에는, 결과로 나타나는 누수의심지점의 신뢰성을 담보할 수 없다는 큰 문제점을 지닌다. 따라서

수리해석 관망의 검 · 보정이 잘 이루어진 경우를 제외한 나머지 경우에는 수리해석 과정에서의 불확실성 인자를 고려한 누수지점 탐지가 이루어져야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 누수탐지 모델의 문제점을 보완하여, 수리해석 시뮬레이션과 절점의 수요량, 관 마찰계수의 불확실성 분석을 통해 개선된 누수탐지모형을 개발하였다. 상수도 관망해석 프로그램인 EPANET2의 에미터(Emitter) 기능을 활용한 Semi-PDA 수리해석 모형을 이용하였으며, 상수관망의 수리해석 시 불확실성이 큰 매개변수인 수요량과 관 마찰계수의 불확실성 분석을 통해 보다 합리적인 누수탐지를 기법을 제안하고자 하였다. 개발된 방법을 실제 검 · 보정이 완료된 국내의 소블력 관망에 적용하였으며, 불확실성을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하여 그 결과를 서로 비교하였다. 적용 결과, 불확실성을 고려한 최적누수탐지 기법을 적용할 경우, 검 · 보정이 완료된 관망의 경우 누수지점 탐지에 있어 불확실성을 고려함에 따라 오히려 그 효율이 감소될 수 있음을 확인하였으며, 검 · 보정이 완료되지 않은 관망의 경우 불확실성을 고려함에 따라 누수확률이 높은 누수의심지점을 우선적으로 선별할 수 있다는 장점이 있었다. 따라서 대부분의 상수관망 시스템은 수리학적으로 검 · 보정이 이루어져 있지 않고, 검 · 보정이 이루어진 관망의 경우에도 관로의 노후화 및 수요량의 변동성에 의해 시간이 지남에 따라 불확실성이 증가하므로, 본 연구에서 고려한 불확실성 인자를 고려한 누수지점 탐지가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 따라서 기존의 현장 누수탐지방법은 경제적, 시간적으로 많은 소모가 되기 때문에 현장 누수탐지를 실시하기 전에 전처리 과정인 제안된 누수탐지모형을 적용한 후 누수의심 지점을 바탕으로 누수탐지를 실행할 경우 경제적, 시간적으로 많은 효율을 보일 것이다. 또한 제안된 방법은 누수지점 최적화를 위한 방법론 뿐만 아니라, 효율적인 누수탐지를 위한 관측 자료의 수 및 관측 지점의 선택에 관한 연구에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 제안된 기법이 추가적으로 다양한 관망에 적용

하여 그 결과를 분석하고, 실제 여건과 흡사한 압력 및 유량 관측 지점이 1~2개로 제한되는 경우에 대한 검증이 추가적으로 수행된다면 기존의 현장 대응의 경험적 누수탐지 기법을 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NRF-2013R1A2A1A01013886).

References

- Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1984) Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Vol. I-II, *John Wiley and Sons, Inc.*
- Babayan, A.V., Kapelan, Z., Savic, D.A., and Walters, G.A. (2005) Least cost design of robust water distribution networks under demand uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 5, pp. 375-382.
- Cataldo, A., Cannazza, G., De Benedetto, E., and Giaquinto, N. (2012) A new method for detecting leaks in underground water pipelines. *Sensors Journal*, IEEE, Vol. 12, No. 6, pp. 1660-1667.
- Chung, K.Y. (2013) Water Leakage Detection Monitoring Simulation using Power Spectrum Analysis. *Journal of the Korean Contents Association*. Vol. 13, No. 1, pp. 48-54.
- Covas, D. and Ramos, H. (2010) Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 136, No. 2, pp. 248-257.
- EPA (2000) EPANET2 USERS MANUAL.
- Geem Z.W., Kim J.H., and Loganathan, G.V. (2001) A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68.
- Giustolisi, O., Laucelli, D., and Colombo, A.F. (2009) Deterministic versus stochastic design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 135, No. 2, pp. 117-127.
- Islam, M.S., Sadiq, R., Rodriguez, M.J., Francisque, A., Najjaran, H. and Hoorfar, M. (2011) Leakage detection and location in water distribution systems using a fuzzy-based methodology. *Urban Water Journal*, Vol. 8, No. 6, pp. 351-365.
- Jung, D.H., Chung, G.H., and Kim, J.H. (2010) Optimal Design of Water Distribution System considering the Uncertainties on the Demands and Roughness Coefficients. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*. Vol. 10, No. 1, pp. 73-80.
- Kang, B.M. and Hong, I.S. (2004) A Study on a Remote Leakage Sensing System in Waterworks Network. *The KIPS Transaction*. Vol. 11-D, No. 6, pp. 1311-1318.
- Kang, D. and Lansey, K. (2010) Demand and roughness estimation in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 137, No. 1, pp. 20-30.
- Kapelan, Z.S., Savic, D.A., and Walters, G.A. (2005) Multiobjective design of water distribution systems under uncertainty. *Water Resources Research*, Vol. 41, No. 11, W11407, doi:10.1029/2004WR003787.
- Khulief, Y.A., Khalifa, A., Mansour, R.B., and Habib, M.A. (2011) Acoustic detection of leaks in water pipelines using measurements inside pipe. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Vol. 3, No. 2, pp. 47-54.
- Lee, K.S. and Cho, B.J. (2000) Leak Detection in Pipe Networks Using Inverse Problem. *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 33, No. 1, pp. 873-878.
- Lee, Y.S. and Yoon D.J. (2004) Pinpointing of Leakage Location Using Pipe-fluid Coupled Vibration. *Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 95-104.
- Lee, Y.S., Yoon, D.J., and Jeong, J.C. (2003) Leak Location Detection of Underground Water Pipes using Acoustic Emission and Acceleration Signals. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*. Vol. 23, No. 3, pp. 227-236.
- Lijuan, W., Hongwei, Z., and Hui, J. (2012) A Leak Detection Method Based on EPANET and Genetic Algorithm in Water Distribution Systems. *Advances in Intelligent and Soft Computing*, Vol. 114, pp. 459-465.
- Oliveira, D.P., Neill, D.B., Garrett Jr, J.H., and Soibelman, L. (2010) Detection of patterns in water distribution pipe breakage using spatial scan statistics for point events in a physical network. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 21-30.
- Park, N.S., Hwang, K.S., Kim, H.Y., Lee S.J., and Park, D.Y. (2003) Development of Leak Detection Program for Water Distribution System Using Remoted Meter-Reading. *Proceeding of Joint Conference of Korean Society of Water and Wastewater/Korean Society of Water Environment*. pp. 245-250.
- Park, P.I., Hong, S.H., Park, N.S., and Chun S.Y. (2004) Comparison of Optimization Methods for Leak Detection Analysis in Pipe Network. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 6, pp. 529-536.
- Song, Y.S (2008) *Development of the Alternative Leak Detection Method using Inverse Method using Impedance Response Method*. Master Thesis, Pusan National University.
- Ye, G. and Fenner, R.A. (2010) Kalman filtering of hydraulic measurements for burst detection in water distribution systems. *Journal of pipeline systems engineering and practice*, Vol. 2, No. 1, pp. 14-22.
- Yoon, J.S., Yoo, D.G., Lee, H.M., and Kim, J.H. (2012) Optimal Leakage Detection Model of Water Distribution Systems Using Semi-Pressure Driven Analysis and Harmony Search. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*. Vol. 12, No. 3, pp. 23-31.

Received May 1, 2014

Revised May 8, 2014

Accepted May 23, 2014