수압기반누수해석에 기반한 상수관망의 누수량 불확실성 분석

Uncertainty Analysis for Leakage of Water Supply Networks using Pressure Dependent Leakage Analysis

이찬욱* · 전정석** · 주진걸*** · 유도근****

Lee, Chanwook*, Jun, Jeongsuk**, Joo, Jin Gul***, and Yoo, Do Guen****

Abstract

Continuous leakage and damage of pipes in the water pipe network can cause local ground clearance (sinkhole), therefore, the safety and disaster management of underground facilities are important. The amount of water leakage varies not only with the pressure in the pipe network, but is also affected by the connection characteristics, tube materials, installation conditions, and operating conditions of the water supply network system. Therefore, there are many limitations in estimating and managing the amount of water leakage in the water supply network, especially when they are based only on measured data. In this study, we propose a methodology to quantify the sensitivity of the parameters used in hydraulic-based leak analysis, for rational leak assessment through hydraulic analysis. The proposed methodology is applied to the representative virtual pipe network, and the variation pattern of leakage amount according to the change of coefficient is quantified. The results of this study can be used as a base, to quantify the uncertainty of the relationship between hydraulic pressure and leakage, for estimating a more realistic leakage amount.

Key words : Leakage, Uncertainty, Pressure Driven Analysis, Pressure Dependent Leakage

요 지

상수관망에서의 지속적인 누수와 관 파손 사고는 국부적인 지반함몰(싱크홀)을 야기할 수 있으므로, 지하시설물의 안전 및 재난관리에 있어도 중요하게 관리되어야 한다. 누수량은 관망내의 수압에 따라 변화될 뿐 만 아니라, 상수관망 시스템의 연결특성, 관 재질, 매설환경, 그리고 운영조건 등에 영향을 받게 된다. 따라서 계측된 자료만을 기반으로 상수관망의 누수량을 추정하고 관리하는 데에는 많은 제약이 있다. 본 연구에서는 수리해석을 통한 누수량의 합리적인 산정을 위해 수압기반누수해석에 사용되는 매개변수의 민감도를 정량화하기 위한 방법론을 제안하였다. 제안된 방법론을 대표적인 가상관망에 적용하고, 계수의 변화에 따른 누수량의 변화양상을 정량화하였다. 본 연구 결과는 보다 현실적인 누수량의 산정을 위한 수압-누수량 관계의 불확실성을 정량화하는 기초연구로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 누수, 불확실성, 수압기반해석, 수압기반누수해석

1. 서 론

우리나라 상수도 보급률은 100%에 가깝지만 2016년 상수

도 통계(MOE, 2017)에 따르면 수도관 파손사고, 노후화 등에 따른 누수로 매년 총 생산량의 10.6%인 약 6억8천250만 톤(팔당댐 저수용량의 2.8배)이 손실되고 있으며, 이를 경제

*정회원, 수원대학교 토목공학과 학부연구생(E-mail: skyblue985@naver.com)

Member, Research student, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

**정회원, 수원대학교 토목공학과 학부연구생(E-mail: wwt9019@daum.net)

Member, Research student, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

***정회원, 동신대학교 토목공학과 조교수(E-mail: jgjo@dsh.ac.kr)

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Dongshin University

****교신저자, 정회원, 수원대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-31-229-8676, Fax: +82-31-220-2522, E-mail: dgyoo411@suwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

적 비용으로 환산할 경우 약 5천 900억 원(생산원가, 868원/m³)에 해당된다. 또한, 상수관망에서의 지속적인 누수는 국부적인 지반함몰(싱크홀)을 야기할 수 있으므로, 지하시설물의 안전 및 재난관리에 있어도 중요하게 관리되어야 한다.

최근 스마트미터 (유량계)의 개발과 적용에 따라 상수도 시스템 내 계측기 설치개수가 확대되는 추세이지만, 운영시스템의 복잡화, 유지관리 비용 증대의 문제에 따라 일부 중요 지점에서 계측된 자료만을 기반으로 상수관망의 누수량을 추정하고 관리하는 데에는 많은 제약이 있다. 이와 같은 제약을 해결하기 위하여, Kim (2009), Wang et al. (2012), Yoon et al. (2012), Kim and Koo (2013), 그리고 Yoo et al. (2014) 등은 누수량을 고려한 상수관망 수리해석을 통해 누수관리 방안을 연구하였다. 누수량을 고려한 수리해석 방법은 크게 1) 누수량을 수요량(Demand)에 포함하여 해석하는 방법, 2) EPANET2 (Rossman, 2000)에 구현된 에미터(emitter)기능을 활용하는 방법, 그리고 3) 수압-누수량의 관계(Pressure-leakage relationship)를 고려하여 해석하는 방법으로 구분할 수 있다. 첫 번째 방법은 가장 간단한 방법으로 실무에서 많이 활용되고 있으나, 상수관망 내 수압의 변화에 따른 누수량의 변화 특성을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 두 번째 방법은 수압에 의한 누수량의 변화를 멍함수 형태($L=A \cdot P^n$)로 고려하나, 관의 재질, 누수 규모 등에 따른 누수 특성을 반영하지 못한다는 문제점이 있다. 세 번째 방법은 수압-누수량의 관계를 수치해석 기법 내에 직접 반영하고, 누수량을 미지수로 고려하여 해석한다는 점에서 이론적으로 이상적이라 할 수 있다. 특히, 본 방법에서 사용되는 대표적인 수압-누수량의 관계식인 Fixed and Variable Area Discharge (FAVAD; May, 1994)는 배경누수와 파손누수, 그리고 관 재질 (플라스틱과 금속재질)에 따른 수압-누수량의 특성을 함께 반영할 수 있다는 점에서도 기존 두 방법에 비해 현실적이다. Wang et al. (2012)은 누수량을 수요량에 포함하여 해석하는 방법을 이용하여, 실제 압력 자료와 수리해석으로 산출되는 압력의 차가 최소화 되는 각 절점의 수요량을 유전알고리즘(Genetic Algorithm)을 통하여 결정하고, 실제 수요량을 제외 한 나머지 양을 해당 지점의 누수량으로 판단하는 기법을 제안하였다. Yoon et al. (2012)과 Yoo et al. (2014)은 EPANET2의 에미터 기능을 사용하여 누수의심지점을 판단하고, 수리해석을 위한 입력인자의 불확실성을 고려한 누수탐지 방법론을 제안한 바 있다. Kim (2009)과 Kim and Koo (2013)는 수압-누수량의 관계를 고려한 누수해석을 수행한 바 있으나, 수압-누수량의 관계를 통한 전체 누수량의 배분에 초점을 맞춰 연구를 수행하였으며, FAVAD식을 고려하지 않았다.

일반적으로 관 파손사고 등에 의해 누수량이 증가될 경우, 상수관망 내의 전반적인 수압은 저하되며, 이와 같은 낮은 수압은 수요자에게 공급되어야 할 단위시간당 물의 양(공급

가능유량)의 저감을 초래한다. 즉, 수용가의 공급성 역시 수압에 영향을 받게 된다. 이와 같은 관점에서 상수도관망의 수리해석기법은 크게 수요기반해석(Demand Driven Analysis, DDA)과 수압기반해석(Pressure Driven Analysis, PDA)의 두 가지로 구분 가능하다. DDA는 절점의 압력과는 상관없이 필요한 용수량은 항상 공급가능하다는 가정을 사용하는 것과 달리 PDA는 절점에서의 압력에 따라 실제 공급 가능한 용수량이 변한다는 가정을 사용한다. 또한, Yoo and Shin (2018)은 PDA를 수압기반누수해석(Pressure Dependent Leakage, PDL)과 수압기반수요해석(Pressure Dependent Demand, PDD), 그리고 이 두 가지가 혼합된 수압기반수요누수해석(Pressure Dependent Demand & Leakage, PDDL)로 구분 한 바 있다. 이 중, PDD의 경우 수리해석을 위해 각 절점 별로 수두에 따른 공급가능량의 관계를 나타내는 HOR 관계식(Head-outflow Relationship)이 입력되어야 하며, PDL은 각 관 별로 수압에 의한 누수량의 특성을 나타내는 FAVAD식의 설정이 필요하다. 다시 말해, PDD와 PDL의 해석 결과는 HOR과 FAVAD 식에 사용되는 계수의 설정 값에 의해 변동되게 된다. Lee et al. (2016)은 HOR관계식의 매개변수의 변화가 절점의 공급가능한 유량에 어떠한 영향을 미치는지 정량적으로 평가한 바 있으며, 분석 결과 멍함수로 표현되는 HOR 관계식의 승수 변화는 절점의 공급량에 유의미한 변화를 가져오는 것으로 확인하였으며, 수리해석 시 이와 같은 변동성을 사전에 인지하고 결과를 분석해야함을 제시하였다. 그러나 수압기반누수해석의 경우 FAVAD식의 계수 값 변화가 누수량에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 거의 수행된바가 없다.

본 논문에서는 수리해석을 통한 누수량의 현실적인 산정을 위해 수압기반해석 모델을 구축하고, 수압기반누수해석에 사용되는 매개변수의 민감도를 정량화하기 위한 방법론을 제안하였다.

2. 방법론

2.1 수압-누수 관계(FAVAD 식)

본 연구에서 활용된 FAVAD의 개념과 식은 May (1994)에 의해 처음 제안 된 바 있으며 Eq. (1)과 같다. Eq. (1)을 활용하면, 야간최소유량의 측정을 통해 산정된 시간당 누수량과 관망내의 평균수압을 이용하여 일일 누수량을 계산할 수 있다. FAVAD 개념의 승수 값의 경우, Lambert (2001)는 관 재질, 누수위치, 파손형태에 따라 승수값은 0.5~2.5의 범위로 나타나며, 특히 연결부와 접합부에서 발생하는 탐지가 어려운 배경누수가 지배적인 시스템과 플라스틱 재질의 관로의 누수에서는 일반적으로 1.5의 값을 나타내며, 파열과 같은 특성으로 나타나는 누수 및 금속재질 관로의 경우에는 0.5에 가까운 값을 나타낸다고 제시한 바 있다. 따라서, 배경 누수 및 파열누수가 혼재되어 있는 일반적인 관망시스템의

경우 Eq. (1) 형태의 FAVAD식을 일반적으로 적용하며, 수리해석 시 C1 및 C2와 같은 계수 값의 설정이 반드시 필요하다. Eq. (1)과 Table 1에서 제시된 C1과 C2의 값은 수리해석 대상 관망의 배경누수량과 파손누수량을 나타내는 유량계수를 의미한다. Lambert et al. (2017)은 Eq. (1)의 C1과 C2를 선정하기 위해 실제 관망 내 야간최소유량의 측정을 수행하였으며, 해당 관망에서 적용 가능한 C1과 C2값은 각각 0.517과 0.0481이라고 제시하고 최종적인 Eq. (2)를 제안하였다(Table 1의 A와 B로 명기된 기준값). Eq. (2)에서의 Area Zone Pressure (AZP)는 급수지역의 평균 수압을 의미한다. Lambert et al. (2017)의 제안 계수는 관망 전체 시스템의 누수량의 계산을 위한 값인 반면, 본 연구에서는 개별 관로의 누수량을 각각 계산하므로, 대상관망의 수압 분포 및 관로의 수를 적절히 고려하여 Table 1과 같은 기준 C1, C2값을 설정하였다. 향후 실제 적용 시에는 야간최소유량의 계측을 통한 기준 C1, C2의 값의 설정이 가능한 경우 해당 값을 사용해야 할 것이나, 본 연구의 목적은 C1과 C2값의 변화에 따른 누수량의 변화 양상을 파악하는 것이므로 대표적인 선행연구의 제안값을 기반으로 계수 기준값을 선정하였다.

Table 1. Calculate of C1 and C2

A	B		C1	C2
0.517	0.0481	Standard Value	0.0120	0.0011
0.1034	0.0096	=	0.0030	0.0003
0.1551	0.0144		0.0045	0.0004
0.2068	0.0192		0.0060	0.0006
0.2585	0.0241		0.0075	0.0007
0.3361	0.0313		0.0090	0.0008

$$L = (0.6 \sqrt{2g} (C1(P)^{0.5} + C2(P)^{1.5})) \quad (1)$$

$$L = 0.517 \times AZP^{0.5} + 0.0481 \times AZP^{1.5} \quad (2)$$

수압기반수요해석의 HOR 관계식의 경우 본 논문의 적용 관망에 대해 Wagner et al. (1988)이 제시한 멱함수 형태를 적용하였으며, 물 공급이 가능한 최소수압은 0 m, 수용가가 만족할 수 있는 충족 수압은 15 m로 설정하여 수리해석을 모의하였다.

2.2 C1 및 C2 조합 방법

본 연구에서는 Table 1에 의해 제시된, C1 및 C2 값의 범위를 기반으로 민감도분석을 위한 조합을 크게 두 가지 경우로 구분하여 이를 Case 1과 2로 제시하였다. Case 1은

Table 2의 (a)와 같이 C1을 고정한 후 C2의 변화를 준 경우이며, Case 2는 Table 2의(b)와 같이 C2를 고정한 후 C1에 변화를 준 경우이다. 본 모형에서 활용된 수압기반해석의 경우 수치해석의 복잡성에 따라 일반적으로 입력 값에 의한 수렴성이 수요기반해석보다 떨어지는 경향이 나타난다. 따라서 본 연구에서는 각 수리해석결과 분석 전 수렴여부를 반드시 확인하게 되며, 본 연구에서 사용된 계수의 조합은 모두 수렴된 결과를 나타내었다.

Table 2. Combination of C1 and C2

(a) Fixed C1(Case 1)		(b) Fixed C2(Case 2)	
C1	C2	C2	C1
0.003	0.0003	0.0003	0.0030
	0.0004		0.0045
	0.0006		0.0060
	0.0007		0.0075
	0.0008		0.0090
0.0045	0.0003	0.0004	0.0030
	0.0004		0.0045
	0.0006		0.0060
	0.0007		0.0075
	0.0008		0.0090
0.006	0.0003	0.0006	0.0030
	0.0004		0.0045
	0.0006		0.0060
	0.0007		0.0075
	0.0008		0.0090
0.0075	0.0003	0.0007	0.0030
	0.0004		0.0045
	0.0006		0.0060
	0.0007		0.0075
	0.0008		0.0090
0.009	0.0003	0.0008	0.0030
	0.0004		0.0045
	0.0006		0.0060
	0.0007		0.0075
	0.0008		0.0090

2.3 개발 모형 구성 및 적용순서

Fig. 1은 본 논문에서 개발된 모형 구성 및 적용 순서이며 PDA해석이 프로그램의 경우 K-Water (2017)에서 제시한 K-NRisk를 사용 하였다.

Fig. 1. Configuration and Application Order

3. 적용 및 결과

3.1 적용 관망

앞서 설명한 PDA 적용이 가능한 K-NRisk에 적용할 가상 관망의 경우 Ozger (2003)에 의해 제시된 바 있으며, 총 수요량은 3,146 CMH(m^3/h)이며, 두 개의 수원에서 물을 공급하며 13개의 절점과 21개의 관로로 구성되며 Fig. 2와 같은 형태이다. 본 논문에서는 관로에서의 누수량, 절점에서의 유출량, 압력 및 공급량의 변화를 각 절점 및 관로의 개별적이 아닌 관망 전체에서의 각 항목의 변화를 살펴보기 위해 앞서 가정한 Table 2의 C1, C2를 모든 관로에 동일하게 배분하였다.

Fig. 2. Application Network

3.2 C1, C2의 적용

Table 2의 두 가지 경우에 대한 C1, C2의 조합 50가지를 K-NRisk 프로그램에 적용해 누수량, 유출량, 공급량, 압력의 평균을 구하여 그래프화 시킨 것이 Figs. 3 (C1고정) 및 4 (C2고정)에 있으며 Figs. 3 및 4의 (a)는 절점에서의 유출량 (Out Flow), (b)는 절점의 공급량(Actual Demand), (c)는 관로

에서의 누수량(Leakage), (d)는 평균 압력(Average Pressure)에 관한 그래프이다. Figs. 3(Case1)과 4(Case2)의 (a,b,c,d)에서 모두 같은 형태의 변화를 보인다. 각 경우에 대한 C값의 변화에 따른 수리학적 변화를 나타내는 기울기 값의 결과는 Table 3과 같다. 이 결과를 통해 C1을 고정한 Case1에서 더 큰 변화율을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 이 변화율은 적용된 C1과 C2의 절대적 범위 값이 서로 다르므로, 두 가지 경우의 값을 객관적으로 비교할 수 없다. 따라서, 단순 변화율로 분석 할 수 있는 것은 제한적이므로 C1과 C2 민감도 결과를 객관적으로 비교할 수 있는 변동폭과 변동계수 분석을 수행 하였다.

Table 3. The Result of Slope Absolute Value

	Out Flow	Actual Demand	Leakage	Pressure
Case1	625,164	165,1996	2,274,760	3,356
Case2	79,188	131,031	209,949	397

3.3 변동폭 분석

Box-whisker란 데이터를 시각화 할 수 있는 간편한 방법 중 하나이며 기술 통계학에서 자주 사용되는 그래프중 하나이다. Box-whisker 그래프의 막대 부분은 값들이 그 부분에 많은 분포를 이룬다는 의미이며, 실선의 양끝은 그 값들 중 최대 최소를 의미한다. 본 논문에서는 C1, C2의 고정 에 따라 변동폭의 변화를 확인하기 위해 사용 하였다. Figs. 5와 6은 Case 1과 Case 2의 Box-whisker 그래프 이다. 그래프 상의 왼쪽부터 오른쪽으로의 순서는 범례의 순서와 동일하다. C1, C2고정값이 작은 경우에서의 전체 항목(a,b,c,d)은 Case1과 Case2에서 거의 동일한 변동성을 갖고 있다. 하지만 고정값을 점차 크게 함에 따라 Case2에서는 Case1보다 더 큰 변동폭을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 C1 값의 변화에 따른 변동성이 더 크다는 것을 알 수 있다. 즉, Figs. 3, 4와 같이 C1이 더 민감하다는 것을 확인 할 수 있다.

3.4 변동계수

변동계수(coefficient of variation)란 표준편차를 평균값으로 나눈 것으로서 표준편차 만 으로는 데이터의 편차를 알기에는 한계가 있으므로 사용되는 계수이다. 본 논문에서는 3.3절에서의 변동폭에 대한 시각적 검증(Figs. 5, 6)을 통해 C1이 더 민감하다 판단 한 것을 수치적으로 확인 할 수 있도록 변동계수를 적용 하였으며, 결과는 Table 4와 같다. 변동계수의 수치를 확인 하였을 시 Box-whisker 그래프의 결과와 마찬가지로 Case2의 변동계수가 Case1의 경우보다 더 큼을 알 수 있다. 이는 C2를 고정시키고 C1을 변화시킨 Case2의 변동성이 크다는 것을 의미하므로 C1이 C2보다 민감하다는 것을 알 수 있다.

(a) Out Flow graph

(b) Actual Demand graph

(c) Leakage graph

(d) Average Pressure graph

Fig. 3. Graph with C1 Fixed (case 1)

(a) Out Flow graph

(b) Actual Demand graph

(c) Leakage graph

(d) Average Pressure graph

Fig. 4. Graph with C2 Fixed (case 2)

(a) Out Flow Box-whisker

(b) Actual Demand Box-whisker

(c) Leakage Box-whisker

(d) Average Pressure Box-whisker

Fig. 5. Box-whisker with C1 Fixed (case 1)

(a) Out Flow Box-whisker

(b) Actual Demand Box-whisker

(c) Leakage Box-whisker

(d) Average Pressure Box-whisker

Fig. 6. Box-whisker with C2 Fixed by (case 2)

Table 4. SD (Standard Deviation) and COV (Coefficient of Variation) of Results

Pressure	SD	COV
Case1	0.416	0.063
Case2	0.655	0.094
Out Flow	SD	COV
Case1	225.232	0.031
Case2	249.544	0.034
Actual Demand	SD	COV
Case1	89.772	0.053
Case2	143.880	0.081
Leakage	SD	COV
Case1	337.848	0.060
Case2	367.444	0.066

4. 결 론

상수관망 수리해석은 누수량의 적절한 관리를 위해 필수적이며, 정확한 누수량의 산정을 위해서는 누수해석에 활용되는 매개변수의 불확실성 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 누수량의 합리적인 산정을 위해 수압기반누수해석에 사용되는 FAVAD 식의 두 매개변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 매개변수의 조합에 따른 누수량, 평균수압, 그리고 공급가능유량의 변화를 분석한 결과 매개변수의 절대적인 값에 누수량, 평균수압이 영향을 미칠 수 있지만 일반적으로 배경누수의 항목으로 알려진 (C1)의 값이 파열누수 항목 매개변수 (C2)보다 민감한 결과를 나타냄을 확인하였다. 이것은 파열누수 항목의 매개변수가 포함된 먹함수식의 승수는 0.5로 배경누수 항목의 승수인 1.5보다 작고, 시스템 전체에 나타나는 누수는 일반적으로 쉽게 확인 불가능한 배경누수의 항목이 더 크게 나타나기 때문이다. 물론, 실제 관망의 특성과 관 파손 특성, 재질 등의 영향에 따라 적용 시스템마다의 기준 매개변수의 값은 야간누수량 측정 등을 통해 보다 객관적으로 산정되어야 할 필요가 있다. 향후연구에서는 이와 같은 실제 누수량 측정을 통한 실제 관망의 적용을 통해 매개변수의 민감도가 관망의 어떤 특성에 영향을 미치는지 확인할 필요가 있다. 또한 수리해석 결과에 영향을 미치는 수요량의 변화 관 파손의 특성, 그리고 관 재질 등의 주변 환경의 불확실성이 누수량의 변화에 어떤 영향을 주는지에 대한 불확실성 분석이 수행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MOIS-재난-2015-03].

References

- Kim, K.P. (2009). *Development of optimal management model for real losses in water distribution system and applicability assessment*. Ph.D. dissertation, University of Seoul.
- Kim, K.P., and Koo, J.Y. (2013). Hydraulic analysis of water distribution networks considering leakage. *Magazine of Korean Water Resources Association: Water for future*, Vol. 46, No. 6, pp. 55-60.
- K-water. (2017). *K-NRisk User's Manual*. Daejeon: K-water.
- Lambert, A. (2001). What do we know about pressure: Leakage relationships in distribution systems? *Proceedings of IWA Conference in Systems Approach to Leakage Control and Water Distribution System Management*, International Water Association, Brno, Czech Republic.
- Lambert, A., Fantozzi, M., and Shepherd, M. (2017). Pressure: Leak flow rates using FAVAD: An improved fast-track practitioner's approach. *Proceedings of Computing and Control for the Water Industry (CCWI 2017)*, Sheffield, UK.
- Lee, H.M., Yoo, D.G., Kang, D., Jun, H., and Kim, J.H. (2016). Uncertainty quantification of pressure-driven analysis for water distribution network modeling. *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol. 16, No. 3, pp. 599-610.
- May, J. (1994). Leakage, pressure and control. *BICS International Conference on Leakage Control*, London, UK.
- Ministry of Environment (2017) *Water supply statistics*. Republic of Korea in 2016.
- Ozger, S.S. (2003). *A semi-pressure-driven approach to reliability assessment of water distribution networks*. Ph.D. dissertation, Arizona State University, Tempe, AZ, USA.
- Rossman, L. (2000). *EPANET User's Manual*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- Wagner, J.M., Shamir, U., and Marks, D.H. (1988). Water distribution reliability: Simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 114, No. 3, pp. 276-294.
- Wang, L. (2012). A leak detection method based on EPANET and genetic algorithm in water distribution systems. In Y. Wu (Ed.), *Advances in Intelligent and Soft Computing Series: Vol. 114* (pp. 459-465). Springer, Berlin, Heidelberg.

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. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 3, pp. 23-31.

Yoo, D.G., and Shin, E.H. (2018). Recent Trends and Proper Applications of Hydraulic Analysis Technique of Water Distribution Networks. *Magazine of Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 45-51.

Yoo, D.G., Yoon, J.S., Lee, H.M., Kang, D., and Kim, J.H.

(2014). Development and application of leakage detection model for water distribution networks considering uncertainty analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 3, pp. 177-185.

Received	November 8, 2018
Revised	November 13, 2018
Accepted	November 19, 2018