상수관망에서의 수압기반수요모의를 위한 K-NRisk 개발 및 적용 Development and Applications of K-NRisk for Pressure Dependent Demand Analysis in Water Distribution Networks

이호민* · 신은허** · 유도근***

Lee, Ho Min*, Shin, Eun Her**, and Yoo, Do Guen***

Abstract

Hydraulic analysis of water distribution networks is important not only for the assessment current status, but also for the near and far future prediction with uncertainties. Hydraulic analysis models can be classified into demand driven analysis (DDA) and pressure driven analysis (PDA) depending on nodal outflow assumption. However, the EPANET2, which is globally used model, does not include PDA module, and therefore hydraulic analysis under abnormal conditions is impossible. In this study, a new multi-scenario based hydraulic analysis model for abnormal conditions, K-NRisk is developed by combining PDA technique. The K-NRisk is compared with the existing commercial softwares, and verified by multi-scenario based modeling for typical abnormal conditions. The results show that, the K-NRisk developed in this study can visualize pressure deficient area under abnormal conditions, and also can quantify the water shortage reasonably. Therefore, the K-NRisk can be used as a decision support tool to improve the efficiency of water distribution network operation, to enhance the revenue water ratio at pressure deficient area.

Key words : Water Distribution Networks, Pressure Driven Analysis, K-NRisk, Abnormal Condition Analysis

요 지

상수도 관수로시스템의 수리해석은 현재 상태의 평가뿐만 아니라, 불확실성에 의한 가깝고 먼 미래의 예측을 위해서도 상당히 중요하다. 관망해석은 공급량의 결정변수설정 여부에 따라, 수압기반해석(DDA)과 수압기반해석(PDA)로 분류될 수 있으나, 전 세계적으로 대표적으로 사용되고 있는 EPANET2 모형은 수압기반해석 기능을 포함하고 있지 않아, 비정상적인 상황에서의 수리해석이 직접적으로 불가하였다. 본 연구에서는 최신의 수압기반해석 이론을 접목하여 다중시나리오 기반의 비정상상황 수리해석을 가능하게 한 소프트웨어(K-NRisk)를 개발하였다. 개발된 소프트웨어를 기존 국외 상용 소프트웨어와 비교하였으며, 대표적 비정상상황에 대한 공급성 모의를 다중시나리오 기능을 기반으로 수행하여 검증하였다. 신규 개발된 K-NRisk 결과는 비정상상황에서 수압 부족 지역을 시각화 할 수 있을 뿐만 아니라 합리적으로 물 부족량을 정량화 할 수 있음을 보여준다. 따라서 K-NRisk는 상수도 운영의 효율화, 압력 부족 지역의 유수율 증대 및 위기 관리를 향상시키는 사용자 의사 결정 도구로 사용될 수 있다.

핵심용어 : 상수관망, 수압기반해석, K-NRisk, 비정상상황해석

1. 서 론

상수도 관수로시스템에 대한 수압기반해석(Pressure Driven Analysis, PDA) 연구가 수압이 부족한 절점에 가상의 저수지

를 생성하는 방법(Bhave, 1991)으로 처음 시작된 이래, 최근 많은 연구자들에 의해 활발히 연구되고 있다(Baek et al., 2007, 2010a, 2010b; Giustolisi et al., 2008a, 2008b; Wu et al., 2009; Lee et al., 2013, 2016). 수압기반해석은 공급량

*정회원, 고려대학교 방재과학기술연구소 연구교수(E-mail: dlgh86@korea.ac.kr)

Member, Research Professor, Research Center for Disaster Prevention and Science Technology, Korea University, Korea

**K-water 융합연구원, 스마트워터연구소 책임위원(E-mail: shin2@kwater.or.kr)

Principal Researcher, Smart Water Laboratory, K-water Convergence Institute, Daejeon, Korea

***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, Korea

(일반적으로 사용량과 누수량의 합)은 잔류수두 또는 수압에 의해 변화되므로, 공급량을 미지수로 보고 해석을 수행하는 방법이다. 기존의 EPANET2 (Rossman, 2000)와 같은 수요 기반해석(Demand Driven Analysis, DDA) 모형은 모든 공급량은 미리 알고 있으며, 이 공급량은 모두 공급가능하다는 전제하에 수리해석을 수행하여, 공급량이 충분한 정상상황의 경우 해석에 문제가 없지만, 공급량 부족지역의 해석이나 일반사고 및 지진과 같은 재해에 의한 수리해석에서는 비현실적인 결과를 도출하였다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 수압기반해석이 제시된 바 있으며 수두-공급량 관계식(Head-Outflow Relationship, HOR)의 도입과 이를 수치적으로 풀기 위한 Todini (2003, 2006)에 의해 제안된 전역경사 기법(Global Gradient Algorithm) 등이 활용되고 있다.

현재까지 대다수의 수압기반해석 연구는 오픈소스 기반의 수요기반해석 모형인 EPANET2의 소스코드 중 수리해석 알고리즘 부분을 수정 개발하는 형태로 진행된 바 있다. 전역 경사 기법이 적용된 Giustolisi et al. (2008a, 2008b)의 WDMetXL과 Wu et al. (2009)의 방법이 적용된 WaterGEMS 역시 EPANET2를 기반으로 개발되었으며, 현재 고가의 상용프로그램으로 관망해석 시장에 활용되고 있다. 국내의 경우 Lee et al. (2013)이 제수밸브의 차폐에 따른 고립구역인 세그먼트(Segment)를 고려한 수압기반해석 모델 개발을 국내 처음으로 시도한 바 있으며 이를 SB-PDA로 지칭하였다. 본 모델 역시 기존의 EPANET2의 소스코드를 일부 수정하여 수압기반해석을 구현하였다. 이와 같이 EPANET2의 기반의 수압기반해석 모형의 경우, 수요기반해석의 수리학적 종결조건을 그대로 활용하고 있기 때문에, 이를 그대로 수압기반해석 모형에 사용할 경우 실제 수렴성을 만족하지 못하는데도 불구하고 결과가 도출될 수 있는 문제를 가지고 있다. EPANET2에서 사용하고 있는 종결조건 값은 반복 시산 전후 각 관로의 유량 총합에 대한 유량 변화의 비로, 관로의 유량 값만을 고려하여 절점 별 계산되는 관로 양 끝단의 전수두의 값의 변화량은 고려되지 않았다. 수요기반해석의 경우, 절점별 공급가능한 유량을 산정하기 위하여 추가적인 미지수와 수두-공급량 관계식을 활용하기 때문에, 수요기반해석보다 수렴조건에 엄격성이 보다 더 요구된다.

EPANET3 (Rossman, 2016)에서는 관로 유량의 변동성과 관로 양 끝 절점의 총수두 변화량을 동시에 고려한 수렴조건을 적용한 수압기반해석 소스코드를 공개한 바 있다. 공개된 EPANET3 코드는 EPANET2를 모든 연구자 및 상수관망 실무자가 활용하고 있기 때문에, 그 파급력이 대단할 것으로 예상되고 있으나, 현재 본 모형의 프로그램코드는 개발과정 중 공개된 것으로, 수리해석 및 프로그램 기능상 많은 제약이 있으며, 이에 대한 검증 검토가 반드시 필요한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 EPANET3 프로그램 코드를 수정하여 단수, 출수불량, 관 파손 등과 같은 사고 및 재해 등 비정상상황에 의한 정확한 수리해석 예측과 효율적인 대응 방안을

마련하기 위한 수압기반해석을 고도화하여 구현하였다. 이를 기반으로 한 비정상상황 공급안정화 사업과 같은 업무 특화된 의사결정 지원 솔루션을 제시하는 상수관망 비정상 수리해석 소프트웨어인 K-NRisk를 개발하고, 다양한 수압기반수요모의가 필요한 비정상상황에 대한 적용을 통해 검증하였다.

2. K-NRisk 모델 및 PDA해석 GUI의 개발

2.1 K-NRisk 모델 및 GUI 개발

K-NRisk는 EPANET3 소스 코드 기반으로 일부 코드가 수정된 향상된 소프트웨어이다. Fig. 1은 K-NRisk의 소스 코드 구조를 보여주고 있으며, 기존 수요기반해석 기능에 수압기반수요모의(Pressure Dependent Demand, PDD)와 수압기반누수모의(Pressure Dependent Leakage, PDL)가 추가되었다. K-NRisk는 수요에 대한 공급성을 정량화할 수 있도록 비정상상황에 따른 단수 및 수압부족 지역을 분석(압력기반수요모의)하고, 누수량 변화에 따른 보다 정확한 수리해석 모의를 위한 압력기반 누수모의 기능을 대표로 수행한다.

2016년 7월말 코드가 공개된, EPANET3와의 대표적인 유사성과 차별성은 우선 EPANET3와 K-NRisk의 경우 수압기반누수모의 기능을 추가로 구현하여, 사용자가 소비하는 필요수량과 관망 자체적으로 손실되는 누수량을 개별적으로 모의할 수 있다는 것이다. 특히 K-NRisk는 EPANET3에 비하여 보다 범용성 있는 일반적인 누수모의 식(Fixed And Variable Discharge, FAVAD)을 모의 가능하게 구현되며, 누수량의 배분역시 관로 양단 절점에 균등배분하는 EPANET3와 달리 수압기반 배분 등의 다양한 형태의 추가 배분이 가능하다. 또한 다양한 시나리오를 한 번에 구동하여 비교분석할 수 있는 다중 시나리오 기능이 GUI로 구현되었으며, 현업 업무에 사용되는 대표적 비정상상황 분석 시나리오를 초보 업무자도 쉽게 구동할 수 있도록 하는 대표업무분석 기능을 제공한다. 마지막으로 수압기반해석에 사용되는 입력인자의 민감도분석을 수행하여 시뮬레이션모델이 가지는 불확실성을 정량화할 수 있다. Table 1은 본 개발 소프트웨어 K-NRisk와 수요기반해석 소프트웨어 EPANET2, 그리고 수압기반해석 소스코드 EPANET3와의 대표적인 차이점을 표로 제시하였다.

Fig. 2는 K-NRisk의 GUI 화면을 각 기능별로 나타내었으며, Fig. 2 상단의 중간 그림은 다양한 시나리오를 한 화면에서 한눈에 확인하고 결과를 분석할 수 있는 다중시나리오 기능을 나타내고 있으며, 상단 오른쪽과 하단 중앙의 경우 다중 수리해석 결과 항목에 대한 시계열 비교 및 구간 별 중단도를 보여주고 있다. 하단 왼쪽의 경우 대표업무 구현 결과 예시를 나타낸 화면으로, 실무에서 자주 활용되는 수리해석 업무(예, 수유량 증가 감소에 의한 수압비교 분석 등)를 절차화하여 초보자도 쉽게 적용할 수 있는 기능을 구현

Fig. 1. Code Revision for K-NRisk Model Development

Table 1. K-NRisk Function Comparisons Compare with EPANET

Function Item	EPANET2(SW)	EPANET3 (Source Code Only)	WaterGEMs	K-NRisk(SW)
Available Demand	Base Demand (Known)	Pressure Dependent Demand (Un-known)	Pressure Dependent Demand (Un-known)	Pressure Dependent Demand (Un-known)
Leakage Modeling	In-direct Method (Emitter)	Direct Method (FAVAD)	In-direct Method (Emitter)	Direct Method (FAVAD)
Auto Leakage Allocation	Impossible	Impossible	Impossible	Possible
Multi Scenario Modeling	Impossible	Impossible	Possible	Possible
Parameter Sensitivity Analysis	Impossible	Impossible	Impossible	Possible
Representative Task	Impossible	Impossible	Impossible	Possible

Fig. 2. GUI and Main Functions of K-NRisk

하였다. 하단 오른쪽의 경우, 수리해석 결과 값을 사용자가 쉽게 편집할 수 있는 사용자 가변형 표로 구현되어 있으며, 이를 엑셀 등의 편집기와 연계가 가능하도록 구성하였다.

2.2 K-NRisk활용 수압기반 해석 구현 절차

수압기반수요모의를 위하여 K-NRisk에서는 1) 수요해석 옵션선택, 2) 수두-공급량 관계식 선택, 3) 수두-공급량 관계식 매개변수 설정, 4) (필요시) 정상상황 및 수요기반해석과의 비교를 위한 다중시나리오 생성, 5) 구동결과 확인의 순서로 진행된다. Fig. 3은 수요해석옵션의 선택과 수두-공급량 관계식 선택 및 매개변수 설정의 화면을 나타내고 있다.

3. 적용 및 검증

본 연구에서 개발된 K-NRisk 프로그램을 검증하기 위하

여 하나의 가상관망과 두 개의 실제 관망 총 세 개의 상수관망에 압력기반수요모의를 적용하였다. 우선, 가상관망의 경우 기존의 수압기반수요해석의 문헌에 많이 활용된바 있어, K-NRisk 모델이 간단한 적용 예에서 기존 문헌 및 상용프로그램의 결과와 동일한 결과를 도출하는지 확인하기 위함이다. 두, 세 번째의 경우 대표적인 비정상상황인 소블럭 내 관 파손 발생 시 공급성의 변화 정량화와 급수구역 내 문제 발생 시 비상연계 관로 개방에 따른 비상급수 가능량 및 공급가능지역 파악을 위해 K-NRisk를 적용하였다.

3.1 기존 문헌 및 상용프로그램과의 비교

모델 검증을 위해 사용된 가상관망의 경우 Ozger (2003)에 의해 제시된 바 있으며, K-NRisk의 다중시나리오 기능을 활용하여 관망의 모습을 나타낸 것은 Fig. 4와 같다. 총 수요량은 3,146 CMH (m^3/h)이며, 두 개의 수원에서 물을 공급하며 13개의 절점과 21개의 관로로 구성되어 있다. 비정

(a) Selection of Demand Analysis Option

(b) Parameter Setting of HOR

Fig. 3. Implementation Process of Pressure Dependent Demand Analysis in K-NRisk

Fig. 4. Ozger(2003)'s Network and Multi-scenarios Results of K-NRisk

Table 2. Comparison Results of Pipe3 Failure Condition

No Failure Condition				Pipe3 Failure Condition								
				EPANET3 (DDA Version)			EPANET3/WaterGEMs (PDD)			K-NRisk (PDD)		
Node ID	Required Demand (m ³ /h)	Total Head (m)	Pres. Head (m)	Available Discharge (m ³ /h)	Total Head (m)	Pres. Head (m)	Available Discharge (m ³ /h)	Total Head (m)	Pres. Head (m)	Available Discharge (m ³ /h)	Total Head (m)	Pres. Head (m)
J1	0.00	59.71	32.28	0.00	60.39	32.96	0.00	60.50	33.07	0.00	60.50	33.07
J2	212.40	59.20	25.67	212.40	60.15	26.62	212.40	60.31	26.78	212.40	60.31	26.78
J3	212.40	56.08	27.12	212.40	34.73	5.77	193.06	41.35	12.39	193.06	41.35	12.39
J4	640.80	54.99	22.99	640.80	34.76	2.76	506.92	41.39	9.39	506.92	41.39	9.39
J5	212.40	55.08	24.60	212.40	42.31	11.83	212.40	46.82	16.34	212.40	46.82	16.34
J6	684.00	49.85	18.46	684.00	34.79	3.40	558.58	41.39	10.00	558.58	41.39	10.00
J7	640.80	49.95	20.39	640.80	36.23	6.67	588.01	42.19	12.63	588.01	42.19	12.63
J8	327.60	48.95	17.56	327.60	36.16	4.77	277.52	42.15	10.76	277.52	42.15	10.76
J9	0.00	52.23	19.62	0.00	49.00	16.39	0.00	51.36	18.75	0.00	51.36	18.75
J10	0.00	53.54	19.40	0.00	51.48	17.34	0.00	53.29	19.15	0.00	53.29	19.15
J11	108.00	48.98	13.93	108.00	46.45	11.40	103.87	48.92	13.87	103.87	48.92	13.87
J12	108.00	48.75	12.17	108.00	45.93	9.35	96.89	48.65	12.07	96.89	48.65	12.07
J13	0.00	52.14	18.61	0.00	38.85	5.32	0.00	44.25	10.72	0.00	44.25	10.72
Total	3,146.40	-	-	3,146.40	-	-	2,749.65	-	-	2,749.65	-	-

상상환을 상정하기 위하여, 좌측 수원과 가까이 연계되어 있는 Pipe 3의 관 파손 사고를 가정하여 모의를 수행하였다. 수두-공급량 관계식의 경우 본 논문의 모든 적용관망에 대해 Power Function을 적용하였으며, 물 공급이 가능한 최소수압은 0 m, 수용가가 만족할 수 있는 서비스 수압은 15 m로 설정하여 수리해석을 모의하였다. 다중시나리오 중 Fig. 4의 왼쪽 그림은 사고가 나지 않은 정상상황을, 중간 그림은 관 파손에 따른 수요기반해석(DDA), 오른쪽 그림은 관 파손에 따른 수압기반수요해석(PDD)의 결과를 나타낸다. 그림과 같이 K-NRisk의 경우 공급가능한 유량에 따라 Demand Status가 Full (전체 수요량 공급가능), Partial (부분공급), None (공급불가)로 구분되어 시각적으로 표출된다. 이와 같은 시각적 표출은 비정상상황 발생 시 의사결정자가 한눈에 공급제한구역을 확인할 수 있다.

Table 2는 Pipe3의 파손에 따른 절점의 압력, 총 수두, 그리고 공급가능한 유량을 EPANET3의 수요기반해석(DDA), 수압기반수요해석(PDD), 상용프로그램 WaterGEMs의 수압기반수요해석(PDD), 그리고 K-NRisk의 수압기반수요해석 결과로 나타낸 표이다. 기존 문헌인 Lee et al. (2016)의 결과와 동일하게, DDA 결과의 경우 서비스 압력 이하의 수리해석 결과가 나타나는 절점이 있음에도 불구하고 모든 절점의 공급가능유량은 기본수요량과 동일한 반면, K-NRisk의 경우 기존 문헌 및 상용프로그램의 수압기반수요해석의 결과

와 동일하게 수압에 의해 공급가능한 유량이 도출되는 것을 확인할 수 있다.

3.2 소블력 비상시 공급성 모의

두 번째 검증의 경우 국내에 존재하는 블록화시스템이 구축된 도시의 실제 소블력 상수관망 IH12로 총 113개의 절점으로 구성되어 정상적인 상황에서 10,995 CMD (m³/d)의 수요량을 공급하고 있다. IH12 소블력은 Fig. 5의 왼쪽 그림과 같이 수원의 유입관에 바로 연결된 두 개의 관 ‘A’와 ‘B’를 통해 물을 공급하고 있다. 본 연구에서는 두 개의 관 중 ‘A’관이 여러 원인에 의하여 공급불가 되는 경우를 수압기반수요해석을 통해 모의하고 이 경우 발생할 수 있는 공급부족량을 K-NRisk를 통해 제시해 보고자 하였다.

Fig. 5의 그림과 같이 K-NRisk 다중시나리오 기능을 활용하여, 기존 정상상황 모의(왼쪽)와 주요 1개소 관로 공급중단 시 모의 결과(오른쪽)를 한눈에 비교할 수 있다. 특히, 모의 결과 공급성 저하지역이 시각적으로 표출됨을 확인할 수 있었으며, Fig. 6과 같이 부족량은 K-NRisk 내 가변형 표 기능을 이용하여 564.1 CMD로 정량화 하여 제시할 수 있다. 이 값은 주요 공급 관로인 ‘A’관이 문제가 생겨 제 기능을 하지 못할 경우, 소블력 내 평상시 공급량(10,995 CMD)의 약 5.1%정도의 용수를 소비자에게 공급하지 못하며, 이 공급량은 특히 Fig. 5의 음영부분에 나타내어진 수요량이

Fig. 5. IH12 Network and Multi-scenarios Results of K-NRISK

Fig. 6. Sum of Deficit under Abnormal Condition in K-NRISK

많은 소블력 중심부 지역에 수압저하로 인한 출수불량 민원이 제기될 수 있음을 의미한다.

3.3 급수구역 간 비상연계

세 번째 적용의 경우, 각 지자체의 공급안정화를 위하여 활용중인 비상연계관로를 개발할 경우 인접 블록을 통해 공급할 수 있는 공급량의 정량화 정도를 K-NRISK를 통해 검토한다. 즉, Fig. 7과 같은 대상관망에 소블력으로 유입되는 SH4 유입밸브의 문제가 발생한 경우를 가정하였다. 이 경우, Fig. 7의 왼쪽 그림('O' 표시)과 같은 비상연계관로가 존재할 경우 비상연계관로 개방을 통해 비상공급을 실시

할 수 있다. 현재까지는 비상연계관로 설계 시 간단한 유량방정식을 통해 공급량을 추정하였는데, K-NRISK를 활용할 경우 실제 해당 비상연계관로를 통해 공급될 수 있는 양과 범위를 정량적으로 파악할 수 있다.

Fig. 7의 오른쪽 그림은 연계관로 공급시 나타나는 단수지역의 저감을 보여주고 있다. 실제 수압기반해석 결과 해당 비상연계관로를 이용하여 공급을 실시할 경우, 단수구역의 정상상황 전제 사용량의 약 32%인 1,723 CMD의 물을 공급할 수 있으며, 비상연계 공급가능 구역을 K-NRISK를 활용하여 가시화 할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 7. Quantification of Emergency Connection Water Supply using K-NRrisk

4. 결 론

수압기반해석은 공급량 분석 항목에 따라 수압기반수요 해석(PDD)과 수압기반누수해석(PDL)으로 구분 할 수 있다. 본 연구에서는 상수관망 비정상상황해석을 위해 최근 활발히 연구되고 있는 수압기반해석을 EPANET3 소스코드 수정을 통해 구현하여 최신의 수리해석 및 소프트웨어 기능이 가능한 K-NRrisk 프로그램을 개발하였다. K-NRrisk의 경우 기존의 EPANET2 기반 소프트웨어에 비해 보다 엄격한 수리해석 종결조건을 고려하고 있어, 프로그램 사용자가 범할 수 있는 오류(실제 제대로 수렴되지 않은 결과를 옳은 결과로 수용)를 상대적으로 줄여 줄 수 있다. 또한, 다중 시나리오 기능과 비정상상황 결과를 한눈에 파악할 수 있는 시각적 표출이 가능하게 하여 실무활용성이 증대되었다고 할 수 있다. 이와 같이 개발된 K-NRrisk 프로그램을 1) 과거 문헌 및 상용프로그램과의 비교, 2) 소블럭 비상시 공급성 모의, 그리고 3) 급수구역 간 비상연계 상황에 직접 적용하여 그 적용성을 검증하였다. 그 결과, K-NRrisk는 수압기반수요 해석에 대한 정확도 뿐만 아니라 사용자의 사용성 확보도 가능하였으며, 특히 다중시나리오는 정상상황과 비정상상황의 비교 분석을 통해 그 차이점을 바로 확인할 수 있었다.

향후, K-NRrisk는 수압기반누수모의에 대한 기능을 탑재하고 있으므로, 상수관망 누수량 분석, 누수량과 수압기반수

요모의를 함께 고려한 실질적 상수관망 해석이 가능하도록 관련 예제 확보 및 검증이 필요하다. 또한, 다양하고 엄격한 수리해석의 종결조건을 사용하고 있으므로 이에 대한 민감도 등을 상세히 검토하여 비정상상황 수리해석 시 나타날 수 밖에 없는 수렴성 문제에 있어 적절한 수리해석 결과를 얻기 위해 필요한 최소한의 수렴성 증대 방안 등의 상세 연구가 이루어질 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. 2014R1A6A3A01056995).

References

- Back, C.W., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2007) Development of HSPDA Model for Water Distribution System under Abnormal Operating Condition. *Journal of Korean Society Civil Engineering*, Vol. 27, No. 5B, pp. 475-488.
- Back, C.W., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2010a) Estimating the Reliability of Water Distribution Systems Using

- HSPDA Model and Distance Measure Method. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 9, pp. 769-780.
- Baek, C.W., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2010b) Estimation of the Reliability of Water Distribution Systems using HSPDA Model and ADF Index. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 2, pp. 201-210.
- Bhave, P.R. (1991) *Analysis of Flow in Water Distribution Networks*. Technomic Publishing, Lancaster.
- Giustolisi, O., Kapelan, Z., and Savic, D.A. (2008a) Extended Period Simulation Analysis Considering Valve Shutdowns. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 134, No. 6, pp. 527-537.
- Giustolisi, O., Savic, D.A., and Kapelan, Z. (2008b) Pressure-driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 5, pp. 626-635.
- 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.
- Lee, H.M., Yoo, D.G., Kim, D.Y., and Kim, J.H. (2013) Development and Application of Pressure Driven Analysis Model based on EPANET. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 4. pp. 121-129.
- 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. (2000) *EPANET2 User's Manual*. US EPA.
- Rossman, L.A. (2016) *EPANET3 in Github*. Retrieved from <https://github.com/OpenWaterAnalytics/epanet-dev/blob/master/src/epanet3.h>
- Todini, E. (2003) A More Realistic Approach to the "Extended Period Simulation" of Water Distribution Networks. *Advances in Water Supply Management*, Edited by Maksimović, Č., Butler, D., Memon, F.A., A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, pp. 173-183.
- Todini, E. (2006) On the Convergence Properties of the Different Pipe Network Algorithms. *Proceedings of 8th Water Distribution System Analysis Symposium ASCE*, Cincinnati, Ohio, USA.
- Wu, Z.Y., Wang, R.H., Walski, T.M., Yang, S.Y., Bowdler, D., and Baggett, C.C. (2009) Extended Global-gradient Algorithm for Pressure-dependent Water Distribution Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 135, No. 1, pp. 13-22.

Received	January 15, 2018
Revised	January 17, 2018
Accepted	January 25, 2018