물 공급시설의 지진재난대비 성능 정량화를 위한 수리해석 기법 개발

Study of a Hydraulic Simulation for Quantifying the Earthquake Reliability of Water Supply Systems

전정석* · 이찬욱** · 임승현*** · 유도근****

Jun, Jeong suk*, Lee, Chan wook**, Lim, Seung Hyun***, and Yoo, Do Guen****

Abstract

Water supply facilities such as water distribution systems are large and spatially distributed and because most facilities are buried underground, conditions cannot be identified and monitored. These types of facilities are thus extremely vulnerable to earthquake disasters, particularly those that occur on a large scale, which can cause tremendous damage. In this study, we propose a hydraulic analysis methodology to supplement the problems posed by existing models to quantify the performance of water supply facilities against earthquakes. The developed methodology can more realistically simulate many pipe leakage and rupture situations. A model was simulated by applying the methodology to a typical virtual network, and new performance quantification indicators were presented and analyzed. The developed model can simultaneously quantify water usage and water leakage generation from the perspective of a supplier in the event of an earthquake. Thus, it can be used as a basic study for establishing disaster guidelines.

Key words : Water Supply Systems, Quantification Index, Seismic Hazard, Hydraulic Simulation, Pressure Driven Analysis

요 지

상수관망 시스템과 같은 물 공급시설물은 규모가 크고 공간적으로 넓게 분포되어 있고, 대부분의 시설물은 모든 상황을 확인할 수 없는 지하에 매설되어 있다. 따라서 큰 규모로 한 번 발생하여도 큰 피해가 발생할 수 있는 지진재난에 상당히 취약하다. 본 연구에서는 물 공급시설의 지진재난 대비 성능 정량화를 위해, 기존 모형의 문제점을 보완할 수 있는 새로운 수리해석 방법론과 절차를 제안하였다. 개발된 방법론은 다수의 관 누수 및 파열 상황을 보다 현실적으로 모의할 수 있다. 대표적인 가상관망에 방법론을 적용하여 모형을 검토하고, 새로운 성능 정량화 지표를 추가 제시하여 분석하였다. 개발된 모형은 지진재난 발생 시 수용가 입장에서의 물 사용 가능량 뿐만 아니라 공급자 입장에서의 누수발생량을 동시에 정량화할 수 있어, 재난에 대비한 가이드라인 수립의 기초연구결과로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 물 공급시설, 성능 정량화 지표, 지진재난, 수리해석, 수압기반해석

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

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

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

Research Student, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

***수원대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: kkara1234@naver.com)

Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

****교신저자, 정회원, 수원대학교 건설환경공학부 조교수/하천환경기술연구소(Tel: +82-31-229-8676, Fax: +82-31-220-2522, E-mail: dgwoo411@suwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, The University of Suwon / Institute River Environmental Technology

1. 서 론

2016년 9월 경주 및 2017년 11월 포항지역에서 발생한 규모 5.8과 5.4의 지진과 상대적으로 규모가 큰 연속된 여진은 더 이상 우리나라가 지진에 대해 안전하지 않다는 것을 보여주고 있다. 규모가 크고 공간적으로 넓게 분포되어 있는 사회기반시설물(지상건물, 학교, 공공시설, 도로 및 상수도 등)은 지진재난에 상당히 취약하며, 사회기반시설물의 피해는 인간의 삶에 직간접적인 영향을 미치게 된다. 이와 같은 사회기반시설 물 중 상수도 시스템과 같은 물 공급시설은 인간이 살아가는데 필수적인 생활 및 공업용수를 공급하는 시설물로 지진재난에 대한 대비가 필수적이다. ME (2017)에 따르면, 전국의 지방상수도 시설물 5,045개 중 62.9%인 3,174개 시설은 내진설계 또는 성능인증이 되지 않은 것으로 조사된 바 있으며, 상수도관로의 경우 총 연장 17,048 km 중 내진적용연장은 2,034 km (12%)에 불과하며, 나머지 15,014 km의 경우 내진적용이 되지 않은 상황이다. 그러나 이와 같은 내진현황은 상수도 시설 소재지 기준, 단수인구 추정은 지자체 내 급수인구 기준으로 가정하여 추정 작성한 것으로, 실제적인 관 파손에 의한 단수인구 등 정확한 공급성에 대한 정량적 산정은 이루어지지 않았다.

물 공급시설의 수리적 특성을 반영한 지진재난 신뢰도 정량화에 대한 연구는 Whitman and Hein (1977), Hall and Newmark (1977) 등에 의하여 간략화된 물공급 시스템에 적용된 초기 연구가 진행된 바 있다. 이후 Wang (2006), Shi (2006), Shi et al. (2006), Wang and O'Rourke (2007), 그리고 Bonneau (2008), Bonneau et al. (2009), Yoo (2013) 등은 실제관망을 대상으로 한 수리해석이 연계된 지진재난 신뢰

도 정량화 연구를 수행하였다. Yoo (2013)는 물 공급시설 전체에 대한 지진재난에 의한 구조적 파손에 따른 수리학적 신뢰성을 산정 하는 소프트웨어인 REVAS.NET (Reliability EVALuation model of Seismic hazard for water supply NETwork)을 개발하였으며, 개발된 모형을 국내 상수관망에 실제 적용하여 지진재해 신뢰성을 평가하고(Yoo, Jung, et al., 2016), 그 결과를 기반으로 한 관로 최적설계 모형을 제안하였다(Yoo, Kang, et al., 2016).

그러나 지금까지 제안된 지진재난대비 성능 정량화와 관련된 연구는 수요기반해석(Demand Driven Analysis, DDA)의 대표적인 모형인 EPANET2 (Rossman, 2000)를 사용하였다. 수요기반해석은 관망 내에 공급되는 모든 수량은 기지의 값으로 고려되어, 수리해석 시 설정된 수량은 반드시 공급된다는 전제하에 수리해석을 수행한다. 이에 따라 지진재난 및 관 파손 사고와 같은 비정상적인 상황에 따른 물의 손실, 이에 따른 수압의 저하로 인한 수용가의 물 공급성 저하 등을 직접 모의할 수 없다. Yoo and Shin (2018)은 수리해석을 위한 물 사용량 관계에 따른 모의상황을 Table 1과 같이 제시한 바 있으며, 지진재난과 같은 비정상상황이나 누수량이 큰 지역의 경우 공급량과 사용량은 같지 않으므로, 수압에 따라 공급량과 누수량의 변화를 고려가능한 수압기반수리해석(Pressure Driven Analysis, PDA)을 수행해야한다고 제시한 바 있다. 특히, Table 2에서 제시한 바와 같이 대규모 피해가 고려되는 지진과 같은 다수의 관로 및 배수지의 파손이 상정되는 수리해석을 수행하는 경우, 수압기반수요 누수해석(Pressure Dependent Demand & Leakage, PDDL)을 수행하여, 보다 현실적인 수리해석 결과를 도출할 수 있도록 해야 한다.

Table 1. Simulation based on Water Usage Relationship

Water usage Relationship	Example
Supply = Usage + Leakage	Analysis of the Viewpoint in which the influence of Water Leakage is the dominant
Supply < Usage	In case of short supply due to drought, etc.
Supply < Usage + Leakage	Pipe breakage occurs due to various causes

Table 2. Proper Analysis Method for Pipe Cetwork Analysis (Yoo and Shin, 2018)

Purpose of pipe network analysis	Demand Driven analysis results	Appropriate method	Related business
Damage Analysis of Pipe Network by Accident and Disaster	A small effect by a single pipe break	Demand Driven Analysis	Plan for emergency action
	A large effect by a single pipe break	Pressure Dependent Demand&Leakage	
	A large number of pipes and drains damaged by a large earthquake	Pressure Dependent Demand&Leakage	Establishment of emergency response manual

수압기반해석은 수압기반수요해석(Pressure Dependent Demand, PDD)과 수압기반누수해석(Pressure Dependent Leakage, PDL)로 구분되며, 수압기반수요누수해석은 위 두 가지를 모두 고려하여 수리해석을 수행하는 방법을 의미한다. 수압기반수요해석은 절점의 공급가능량은 최소수두와 충족수두를 기준으로 설정되는 수두-공급가능량 관계식(Head-Outflow Relationship, HOR)에 의해 결정되며, 비선형적인 관계에 있는 수두와 공급가능 유량을 동시에 계산한다. 수압기반누수해석의 경우 누수량은 관내 압력수두에 따라 변화된다는 관계식에 의해 결정되며, 관로의 재질 별 누수계수와 누수지수의 조합으로 표현되는 식을 이용하여 관내 압력수두와 누수량을 동시에 계산한다. 대표적인 관계식은 May (1994)에 의해 제안된 Fixed and Variable Area Discharge (FAVAD)식이 있다.

본 연구에서는 물 공급시설의 지진재난 신뢰성 정량화 최신 모형인 RAVAS.NET의 한계점으로 지적되는 수요기반 수리해석 기법을 보완한 수압기반해석기반 신뢰성 정량화 모형을 개발하였으며, 이를 위해 각 관 파손 상태에 따른 수리해석 모델링 구현 방법 및 절차를 새롭게 제안하였다. 제안된 모형을 대표적 가상 관망에 적용하여 그 결과를 분석하였다.

2. 방법론

2.1 지진 시 관파손 모델링 기법

2.1.1 REVAS.NET과 제안된 모형 비교

각 구성요소의 지진에 의한 상태가 결정되면, 이를 관망해석 프로그램에 적절히 반영하여 수리해석결과를 도출해야한다. REVAS.NET의 경우 Semi-PDA 기법을 사용하였으며, 관 상태가 누수 또는 파괴로 구분되어 관의 누수 면적에 따른 누수량을 계산하여 이를 EPANET 입력인자로 적절히 고려해야하며, 누수 현상을 간접적을 모의하기 위하여 에미터 기능을 사용하였으며, 에미터 계수를 산정하기 위하여 Puchovsky (1999)에 의해 제시된 식은 Eq. (1)과 같다.

$$C_D = \left(\frac{2g}{r_w} \right)^{0.5} A \quad (1)$$

위의 식은 파손 단면적과 유량, 압력의 단위에 따른 파손 면적과 유량계수의 관계 계수를 활용하였다. 파열인 경우, 관의 단면적 전체를 고려하였으며, 누수일 경우 관 단면적의 10%를 파열 면적으로 가정하였다.

Table 3은 REVAS.NET과 제안된 모형에 대한 비교표이다. 정상상태인 경우 공급량과 사용량이 동일하다는 것을 전제로 적용 하였으며, REVAS.NET 과 제안된 모형의 일반적인 상황에서는 조치를 취하지 않았다. 제안된 모형에서는 PDA기법(Pressure Driven Analysis)을 사용하였으며 수압기반해석을 하기 위해서는 수압기반누수해석(PDL) 및 수압기반수요해석(PDD)을 해석해야 한다. 이와 같은 수리해석을 하기 위하여 수압기반해석이 가능한 K-NRisk (K-water, 2017)를 사용하였다. 수압기반수요해석(PDD)의 경우 Wagner et al. (1988)이 제시한 먹합수 형태를 적용하였으며, 절점의 공급가능량은 최소수두와 충족수두를 기준으로 설정되는 수두-공급가능량 관계식에 의해 최소수압 및 최대수압을 결정해야 한다. 수압기반누수해석(PDL)의 경우 누수량은 관내 압력수두에 따라 변화된다는 관계식에 의해 결정되며, 관로의 재질 별 누수계수와 누수지수의 조합으로 표현되는 식을 이용하여 관내 압력수두와 누수량을 동시에 계산하여 FAVAD식을 작용한다. 제안된 모형에서는 다음의 Eq. (2)을 적용한다. C1은 배경누수계수, C2는 파열계수를 의미한다.

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

2.2 공급성 산정 지표

2.2.1 System Serviceability (S_s)

System Serviceability(S_s)는 지진 모의 발생 시 수리해석을 통해 그 결과를 정량화하기 위한 지표로 Yoo (2013)가 개발한 지진재난에 의한 구조적 파손에 따른 수리학적 신뢰성을 산정 하는 소프트웨어인 REVAS.NET에서 신뢰성을 평가하기 위해 사용되고 있는 지표이며, 본 연구에서는 신뢰성 인자로 적합하다고 알려진(Cullinane et al., 1992; Tabucchi et al., 2010; Lansey, 2012) System Serviceability (S_s)를 사용하였다. 신뢰성 인자의 계산 방법은 Eq. (3)과 같다.

Table 3. A Comparison of REVAS.NET and Suggested Model

	REVAS.NET	Suggested model
Normal	-	-
Leakage	Reflected as Emitter coefficient of EPANET2	Setting the C1 and C2 value using the FAVAD equation
Breakage	All of the pipe sections are assumed to be destroyed, Pipe Status: closed	Setting the C1 and C2 value using the FAVAD equation, Pipe Status: Closed
Technique	Semi-PDA	Full-PDA

$$\text{System Serviceability } (S_s) = \frac{\sum Q_{avl,i}}{\sum Q_{ini,i}} \quad (3)$$

Here, $Q_{avl,i}$ = Available nodal demand at node i
 $Q_{ini,i}$ = Required nodal demand at node i

System Serviceability (S_s)는 지진 재해에 의한 시스템의 공급성을 평가하기 위한 인자로, 요구 수요량과 이용 가능한 공급량의 비로 이 값이 1인 경우 시스템의 서비스가 적절하게 지속되고 있다는 결과를 도출해 낼 수 있다. 이 값을 상수관망의 공급성을 나타내는 인자로 보통 가용성(Availability)이나 사용성(Serviceability)로 정의되어 사용되는 인자로 정의하였다.

2.2.2 Leakage Ratio Index (L_{ri})

본 모형은 사용량 및 누수량이 증가 및 감소하여 실제 공급되어야 하는 양이 충족되지 않더라도 공급이 가능하다고 가정했다. 즉 실제 관망에 공급되어야 할 공급량이 실제 정수장의 수량보다 많더라도 공급이 가능하다고 가정한다. 이러한 이유로 신뢰성 인자를 S_s 뿐만 아니라 수압에 따른 누수량의 지표(L_{ri})를 포함하여 시스템 공급성을 평가한다. L_{ri} 는 시스템의 공급성을 평가하기 위한 인자로, 시스템의 전체 요구수요량과 전체 관로의 누수량의 비로 나타낸다. 이 신뢰성 인자의 계산 방법은 Eq. (4)에 제시되어 있다. L_{ri} 값이 1인 경우 누수량과 요구수요량이 동일하다는 뜻으로 공급량을 2배 늘려야 하는 것을 알 수 있다.

$$\text{Leakage Ratio Index } (L_{ri}) = \frac{\sum L_i}{\sum Q_{ini,i}} \quad (4)$$

Here, L_i = Leakage at pipe i
 $Q_{ini,i}$ = Required nodal demand at node i

2.3 모형 구성

2.3.1 모형 구동 순서

제안된 모형의 전체적 모형 순서도는 Fig. 1과 같다. 첫 번째로 적용관망 정보에서는 수요량, 수압, 절점 및 관로의 개수를 확인한다. 지진시나리오 상정 과정에서는 여러 개의 시나리오를 가정하는데 있어서 누수가 발생하는 관로를 1개씩 증가 하거나 누수가 발생하는 관로를 감소시키고 파열된 관로로 변경하는 방법으로 누수량 변화에 따른 공급성을 평가한다. 수리해석 방법으로는 수압기반해석(PDA)을 적용하여 수리해석을 수행하며, 수압기반수요해석(PDD)의 경우 Haed-outflow Relationship (HOR) 관계식에 의해 최소수압 및 최대수압을 결정하고, 수압기반누수해석(PDL)

의 경우 Fixed and Variable Area Discharge (FAVAD) 식을 적용하여 C1, C2값을 적용한다. 마지막으로 수리학적 성능 정량화 부분에서는 시스템의 공급성을 평가하기 위한 인자로, System Serviceability (S_s) 및 새롭게 제안한 수압에 따른 누수량의 지표인 Leakage ratio index (L_{ri})을 이용하여 지진 재해에 의한 시스템의 공급성을 정량화 한다.

Fig. 1. Model Procedure

3. 적용 및 결과

3.1 적용 관망

모형 검증을 위해 사용된 가상관망의 경우 Ozger (2003)에 의해 제시된 바 있으며, K-NRisk의 다중시나리오 기능을 활용하여 관망의 모습을 나타내었다. 제시된 Fig. 2는 사용된 적용 관망이다. 총 수요량은 $3146 \text{ CMH} (m^3/h)$ 이며, 두 개의 수원에서 물을 공급하며 13개의 절점과 21개의 관로로 구성되어 있으며, 배수구역의 관로와 절점의 위치가 표시되어 있다. 직경 400 mm 이상의 관은 6개이며, 대부분이 150 mm에서 400 mm 사이의 직경을 가진 관으로 구성되어 있다.

Fig. 2. Application Network

3.2 관파손 시나리오 매개변수 설정

본 논문에서는 수압기반해석을 하기위하여 매개변수를 설정하기 위해 수압기반수요해석(PDD)의 경우 Head-outflow Relationship (HOR) 관계식에 의해 최소수압은 0 m 최대수압은 15 m로 가정하였다. 수압기반누수해석(PDL)의 경우 Fixed and Variable Area Discharge (FAVAD) 식을 적용하였으며 현재 FAVAD 계수는 불확실성을 가지고 있으며, 정상, 누수, 파열상태의 C1, C2값을 가정하여 분석하였다. 지진재해에 의한 정량적 평가를 위해 비정상상황을 상정하기 위하여 제시된 Table 4와 같이 총 30개의 상황을 가정하여 모의를 수행하였으며, case 1~case 10은 누수 된 관로의 개수가 증가할 때마다의 누수량(Leakage) 및 실제 공급량의 변화량 분석을 위한 자료이며, case 11~case 30은 누수 된 관로가

감소되고 그 부분에 파열된 관로로 대체하였을 경우의 누수량 및 실제공급량변화량 분석을 위한 자료이다.

3.3 적용 및 결과

적용된 30개의 시나리오의 결과는 Table 4에 제시되어 있다. 결과를 살펴보면, 지표평균의 경우 S_s 값은 0.76으로 요구수요량에 약 25%가 해당 지진재난에 의해 공급이 될 수 없음을 알 수 있으며, L_{ri} 은 0.956로 1에 가까운 값을 보여, 요구수요량과 거의 차이가 나지 않는 누수량이 나타나 는 지진재난을 상정한 것을 알 수 있다.

Fig. 3(a)의 경우 누수 된 관로의 개수가 1개씩 증가할 때마다의 누수량 및 실제공급량의 변화량을 나타내고 있으며, S_s 및 L_{ri} 의 변화량은 Fig. 3(b)에 제시하였다. 누수 된

Table 4. Results of Reliability and Leakage Evaluation Scenarios for Suggested Model

case	Pipe Break Characteristics (Number)			Leakage (CMH)	Actual Demand (CMH)	Pressure (m)	S_s	L_{ri}	case	Pipe Break Characteristics (Number)			Leakage (CMH)	Actual Demand (CMH)	Pressure (m)	S_s	L_{ri}
	Normal	Leakage	Breakage							Normal	Leakage	Breakage					
1	20	1	0	2711.11	2644.02	7.67	0.84	0.86	16	12	8	1	3024.81	2435.22	6.81	0.77	0.96
2	19	2	0	2743.41	2623.43	7.52	0.83	0.87	17	12	7	2	3098.39	2353.44	6.86	0.75	0.98
3	18	3	0	2756.00	2614.80	7.44	0.83	0.88	18	12	6	3	3107.45	2343.49	6.82	0.74	0.99
4	17	4	0	2764.32	2608.30	7.39	0.83	0.88	19	12	5	4	3316.30	1867.12	6.06	0.59	1.05
5	16	5	0	2778.05	2599.86	7.32	0.83	0.88	20	13	7	1	2990.14	2451.27	6.88	0.78	0.95
6	15	6	0	2794.47	2591.44	7.22	0.82	0.89	21	13	6	2	3065.26	2371.30	6.94	0.75	0.97
7	14	7	0	2885.98	2574.78	7.05	0.82	0.92	22	13	5	3	3074.16	2361.33	6.89	0.75	0.98
8	13	8	0	2923.55	2549.91	6.98	0.81	0.93	23	13	4	4	3284.20	1895.17	6.08	0.60	1.04
9	12	9	0	2956.58	2531.53	6.97	0.80	0.94	24	14	6	1	2959.11	2475.68	6.92	0.79	0.94
10	11	10	0	3046.12	2498.65	6.76	0.79	0.97	25	14	5	2	3028.45	2401.91	6.96	0.76	0.96
11	11	9	1	3112.05	2413.65	6.65	0.77	0.99	26	14	4	3	3039.41	2389.37	6.92	0.76	0.97
12	11	8	2	3181.51	2338.59	6.70	0.74	1.01	27	15	5	1	2868.25	2493.05	7.09	0.79	0.91
13	11	7	3	3190.80	2330.17	6.66	0.74	1.01	28	15	4	2	2945.06	2409.60	7.14	0.77	0.94
14	11	6	4	3338.67	1852.39	6.02	0.59	1.06	29	16	5	1	2852.58	2501.55	7.18	0.80	0.91
15	11	5	5	3470.11	1681.49	5.89	0.53	1.10	30	16	3	2	2935.74	2409.99	7.25	0.77	0.93
Average									-	-	-	-	3008.06	2387.08	6.90	0.76	0.96

(a) Leakage and actual demand graph

(b) S_s , L_{ri} graph

Fig. 3. Case 1 ~ 10 Results

관로의 개수가 1개씩 증가할 때마다 관망의 평균압력은 약 0.1 m씩 감소하며 누수량은 약 20~30 (CMH) 증가한다. 이에 따라 시스템의 신뢰도 (S_s)는 약 0.01 감소하고 L_{ri} 는 약 0.01에서 0.03 증가한다.

Figs. 4 ~ 6은 case 11~23의 결과를 나타내고 있다. 이 경우는 누수된 관로가 파열 된 관로로 변경될 경우의 그래프이다. 이 경우 누수 된 관로가 감소하고 파열 된 관로가 1개씩 증가할 경우 누수량은 약 70~100 (CMH)이 감소하게 된다. 그리고 S_s 는 약 0.04~0.15 감소하고 L_{ri} 는 약 0.01~0.04 증가한다. L_{ri} 의 값이 1이 넘는 경우가 있는데 이 경우는 누수량이 요구수량보다 더 많다는 값으로 기존 공급량의

2배를 공급해야 시스템에 서비스가 지속될 수 있다.

본 연구에서 적용된 관망수리해석 모형은 지진재해와 같은 대규모 관 파손 상황이 발생한 경우, 누수량의 증가에도 불구하고, 수리해석의 결과로 산정되는 공급가능한 유량과 누수량의 총합은 수원에서 무한히 공급가능한 것으로 간주한다. 이것은 실무에서 대부분 활용되고 있는 모든 수리해석 모형의 특성이라 할 수 있다. 이와 같은 상황은 단일 관 파손 모형 등과 같이 손실유량이 크지 않은 경우에는 큰 문제가 없지만, 대규모 관 파손 상황에 따른 누수량이 증가될 경우, 증가된 누수량 만큼의 공급량을 정수장에서 공급할 수 있는 능력이 되는지를 반드시 검토해야만 한다. 따라서,

(a) Leakage and actual demand graph

(b) S_s , L_{ri} graph

Fig. 4. Case 11 ~ 15 Results (Normal: 11)

(a) Leakage and actual demand graph

(b) S_s , L_{ri} graph

Fig. 5. Case 16 ~ 19 Results (Normal: 12)

(a) Leakage and actual demand graph

(b) S_s , L_{ri} graph

Fig. 6. Case 20 ~ 23 Results (Normal: 13)

본 연구모형에서는 S_s 와 L_n 와 같은 정량화 지표를 통해 해당 관망시스템에 지진재난이 발생하였을 경우 정수처리된 물을 공급하는 정수장 및 배수지 용량의 적절성 여부를 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 지진재난의 발생에 따라 대표적인 물 공급 시설물인 상수도시스템에 구조적 피해가 발생하였을 경우, 그 피해의 정도를 수리학적으로 정량화하는 모형을 개발하였다. 개선된 모형은 기존 모형이 고려하지 못했던 수압기반 수요 및 누수해석의 수행을 통해 수압에 따른 공급가능량(S_s)과 수압에 따른 누수량의 지표(L_n)를 새롭게 제안하였으며, 그 결과를 대표적인 가상관망에 적용하여 분석하였다. 분석 결과 보다 합리적이고 현실적인 수리해석 이론 방법을 적용함에 따라, 관 파손 특성(정상, 누수, 파열)에 따른 누수량의 증가 및 감소 특성을 명확히 설명할 수 있었으며, 정량화된 지표의 특성을 통해 지진재난을 고려하였을 경우 공급해야 하는 비상공급량을 산정할 수 있었다. 따라서 개발된 모형은 최근 국내에서도 빈번히 발생하고 있는 지진재난에 대비한 물 공급 시설의 운영 가이드라인 또는 비상대처계획의 객관적 수립을 위한 기초연구로 활용될 수 있다. 추후연구에서는 개발된 모형의 결과를 기 개발 모형 및 기존 수리해석 모형의 결과와 비교 분석하여 그 차이점을 분석해야하며, 대규모 실제 관망에 적용하여 수리해석의 수렴성 등의 검토를 수행할 필요성이 있다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공분야기초연구사업(생애 첫 연구사업)의 성과이며, 이에 감사드립니다 (NRF-2018R1C1B5046400).

References

- Bonneau, A.L. (2008). *Water supply performance during earthquakes and extreme events*. Ph.D. dissertation, Cornell University, Ithaca, New York.
- Bonneau, A.L., and O'Rourke, T.D. (2009). *Water supply performance during earthquakes and extreme events*, Technical Report MCEER-09-0003, University of Buffalo, State University of New York, New York.
- Cullinane, M.J., Lansey, K.E., and Mays, L.W. (1992). Optimization-availability-based design of water-distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 3, pp. 420-441.
- Hall, W., and Newmark, N. (1977). Seismic design criteria for pipelines and facilities. *Current State of knowledge of Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, New York, pp. 18-34.
- K-water. (2017). *K-NRisk user's manual*. Daejeon, Korea.
- Lansey, K.E. (2012). Sustainable, robust, resilient, water distribution systems. *Proceedings of the 14th Water Distribution Systems Analysis Symposium*, Engineers Australia, Adelaide, Australia.
- May, J. (1994). Leakage, pressure and control. *BICS International Conference on Leakage Control*, London, UK.
- Ministry of Environment (ME). (2017). *Report for seismic resistant status of waterworks*. Republic of Korea.
- 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.
- Puchovsky, M.T. (1999). *Automatic sprinkler systems handbook*. National Fire Protection Association (NFPA).
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET 2 user's manual*. EPA/600/R-00/57, U. S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, DC, USA.
- Shi, P. (2006). *Seismic response modeling of water supply systems*. Ph.D. dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY.
- Shi, P., O'Rourke, T.D., and Wang, Y. (2006) Simulation of Earthquake Water Supply Performance. *Proceeding of 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 8NCEE-001295, EERI, Oakland, CA.
- Tabucchi, T, Davidson, R., and Brink, S. (2010). Simulation of post-earthquake water supply system restoration. *Civil Engineering and Environmental System*, Vol. 27, No. 4, pp. 263-279.
- Wagner, J.M., Shamir, U., Marks, D.H. (1988). Water distribution reliability: Simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 114, pp. 276-294.
- Wang, Y. (2006) *Seismic performance evaluation of water supply systems*. Ph.D. dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY.
- Wang, Y., and O'Rourke, T.D. (2007). Characterizations of seismic risk in Los Angeles water supply system.

- Proceedings of 5th China-Japan-US Symposium on Lifeline Earthquake Engineering*, Haikou, China.
- Whitman, R.V., and Hein, K.H. (1977). Damage probability for a water distribution system. *Proceedings of the ASCE TCLEE Specialty Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, August 31, pp. 410-423.
- Yoo, D.G. (2013). *Seismic reliability assessment for water supply networks*. Ph.D. dissertation, Korea University, Republic of Korea
- Yoo, D.G., Jung, D., Kang, D., Kim, J.H., and Lansey, K. (2016). Seismic hazard assessment model for urban water supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 142, No. 2, pp. 04015055-1~14.
- Yoo, D.G., Kang, D., and Kim, J.H. (2016). Optimal design of water supply networks for enhancing seismic reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 146, pp. 79-88.
- Yoo, D.G., and Shin, E.H. (2018). Recent trends and proper applications of hydraulic analysis technique of water distribution networks. *Magazine of the Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 45-51.

Received	September 3, 2018
Revised	October 27, 2018
Accepted	November 27, 2018