수리학적 특성을 고려한 상수관로 내진성능 예비평가 방법론 개발

Development of Preliminary Seismic Performance Evaluation Method for Water Supply Pipes considering Hydraulic Characteristics

최정욱* · 강두선** · 정동휘*** · 이찬욱**** · 유도근***** · 조성배*****

Choi, Jeongwook*, Kang, Doosun**, Jung, Donghui***, Lee, Chanwook****, Yoo, Do Guen*****, and Jo, Seong-Bae*****

Abstract

The seismic performance evaluation of water supply systems is generally conducted in two stages: a preliminary and a detailed evaluation process. In the case of water pipelines, the priority pipes are selected through preliminary evaluation for a detailed evaluation. However, as the preliminary seismic performance evaluation method for existing water pipes solely focuses on their installation year and structural evaluation, it does not reflect the hydraulic characteristics of the water supply, which is the main purpose of water pipes. Therefore, this study proposed an evaluation method for the existing preliminary evaluation judgment index, by considering the calculation method for the probability of spatial failure, as well as the index obtained through hydraulic analysis results. The proposed methodology was applied to a domestic regional water supply system to be verified, and the results were analyzed. The proposed method is expected to serve as a result of basic research to enhance the seismic performance evaluation method in the future.

Key words : Seismic Performance Evaluation Method, Water Supply Pipe, Hydraulic Analysis

요 지

상수도시스템에 대한 내진성능평가는 일반적으로 예비평가와 상세평가 두 단계로 수행된다. 특히 상수관로의 경우 예비평가를 통해 우선순위를 선정하고, 그 결과 의해 상세평가가 이루어지므로 예비평가는 매우 중요하다. 그러나 기존 상수관로에 대한 내진성능 예비평가 방식은 매설경과년수와 구조적 평가에 중심으로 수행되어 상수관로 본연의 목적인 물공급을 위한 수리학적 특성을 반영하고 있지 않다. 본 연구에서는 기존 예비평가 판단지표에 공간적인 파괴확률 산정방식과 수리해석 결과를 통해 얻어지는 지표를 추가적으로 고려하여 평가하는 방안을 제안하였다. 제안된 방법론의 검증에 위해 국내 실제 광역상수도 시스템에 적용하고 그 결과를 분석하였다. 본 연구는 향후 내진성능평가 방안 고도화를 위한 기초연구결과로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 내진성능평가, 상수관, 수리해석

*정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 박사과정(E-mail: cjw4859@naver.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

**정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수(E-mail: doosunkang@khu.ac.kr)

Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

***정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 조교수(E-mail: sunnyjung625@korea.ac.kr)

Member, Assistant Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

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

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

*****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

*****K-water 연구원 물인프라에너지연구소 선임연구원(E-mail: js135@kwater.or.kr)

Senior Researcher, Water Energy & Infrastructure Research Center, K-water Institute

1. 서 론

최근 전세계적으로 발생하는 자연재난의 규모와 횟수가 점차 커짐에 따라 도시지역 사회기반시설물에 극한재난이 발생하였을 경우, 이에 따른 위험도를 평가, 예측하고 대책을 마련하는 것은 필수적이라 할 수 있다. 국내의 경우 여타 재난에 비하여 지진에 의한 영향은 상대적으로 미비하다고 알려져 있었지만, 최근 규모 3.0 이상의 중규모 지진이 빈번히 발생하고 있어 향후 발생 가능한 대규모 지진에 대한 내진성능확보의 중요성 역시 높아지고 있다. 특히, 상수도시스템은 대부분의 관로가 지하에 매설되어있고, 설치 범위가 매우 넓어 지진에 의한 피해에 취약한 사회기반시설물 중 하나이다.

국내 상수도 시설물 내진성능평가의 실무적 방법론에 관한 연구는 KISTEC (2004)에 의해 처음 시작되었다. Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation (KISTEC)은 해당 연구에서 MOCT (1997)와 ME (1999)에서 제시된 기초 내용을 바탕으로 상수도 시설물의 내진성능평가 방법론을 제시하였다. 해당 연구에서 제시한 평가 방법은 예비평가와 상세평가 2단계로 나누어 진행되며, 현재 활용되고 있는 상수도 시설물의 내진성능평가 방법의 근간이 되었다. 이후, K-water (2013)와 KISTEC (2015)에 의하여 상수도시설물의 내진성능평가 절차를 개선하려는 연구가 추가적으로 수행된 바 있다. K-water (2013)는 기존 예비평가와 상세평가 단계에서 사용되는 변수들 중 주관적 판단을 요하거나 도출 방법이 복잡한 변수를 제외하여 평가하는 개선안을 제시하였다. KISTEC (2015)은 2004년에 수행된 기존 상수도의 내진성능 평가 방안을 보완하고 보다 직관적으로 시각화된 내진평가 소프트웨어의 개발을 목표로 수행되었다.

현재 국내에서 수행되고 있는 상수도 시설물 내진성능평가는 예비평가와 상세평가 두 단계로 구분된다. 내진성능평가의 대상을 모든 상수관로로 확대할 경우, 구성요소의 수가 매우 많고 광범위해지므로 모든 관로에 대한 구조적 상세평가는 현실적으로 불가능하게 된다. 이와 같은 이유로 상세평가 우선순위 결정을 위한 예비평가가 진행된다. 예비평가는 문헌자료 및 현장조사에 근거하여 실시되며, 상세평가는 예비평가 결과와 내진성능 평가수준(기능수행수준/붕괴방지수준)에 따라 기존 상수도 시설 구성부재의 내진성능이 평가된다. 따라서 상수관로의 내진성능평가에서는 평가대상을 선택하게 되는 예비평가의 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 그러나 기존 예비평가 방법의 경우 관로의 매설년수와 구조적 성능지표만을 통해 지진 취약도를 평가하게 되어 관로 본연의 목적인 물공급에 따른 수리학적 특성이 고려되지 않는다. 따라서 지속적이며 빈번하게 발생되고 있는 지진에 대비한 상수도 시설물(관로)의 위험도를 평가하기 위해서는 파괴확률과 관 누수 및 파단 상태와 같은 수리학적 특성이 고려될 필요가 있다.

본 연구에서는 상수도 시설물의 내진성능평가 절차 중에서 지진 취약도를 결정하는 예비평가 단계에 대한 고도화 방안을 제안하고자 하였다. 이를 위해 기존 예비평가에서 수행되던 구조적 분석뿐만 아니라 공간적인 관로 파괴확률과 지진상황을 모의한 수리해석 결과를 추가하는 방법론을 제안하였다. 또한, 제안된 절차를 실제 운용중인 광역상수도 시스템에 적용하여 취약도 지수에 의한 우선순위를 산정하고 기존 내진성능 예비평가 결과와의 비교분석을 통해 검증하였다.

2. 방법론

2.1 지진 시 상수도 관로의 공간적 파괴확률

Repair Rate (RR)는 관의 취약도를 정량적인 수치로 표현한 것으로 단위 길이당 관 파손 지점 수(보통 단위 길이는 1,000 ft 사용)의 단위를 가진다. ALA (2001)는 과거 지진자료를 바탕으로 관중, 관접합부, 관경, 그리고 부식상태 등의 관 정보가 없을 경우 최대지반속도에 의한 RR 식을 Eq. (1)과 같이 제시한 바 있다. 그러나 본 연구에서는 관 정보를 적용하여 보다 정확한 RR를 산정하고자 Isoyama et al. (2000)이 제안한 보정계수를 활용하고자 하였다. Isoyama et al. (2000)은 1995년 일본에서 발생한 지진이 관로에 미치는 영향 자료를 통계적으로 분석하여 관중, 관경, 매설지형, 액상화 조건에 따라 변화된 RR를 보정할 수 있는 계수를 제시한 바 있다. Yoo (2013)는 제안된 보정계수를 Eq. (1)에 적용하고 Eq. (2)와 같은 관로 파괴확률 산정에 필요한 RR를 제안한 바 있다. 여기서 $C_1 \sim C_4$ 는 순서대로 Isoyama et al. (2000)이 제안한 관중, 관경, 매설지형, 액상화에 대한 조건을 의미한다. 본 연구에서는 해당하는 조건 데이터를 확보 및 대표적으로 설정 할 수 있어 비교적 정확한 Eq. (2)를 활용하여 RR를 산정하였다.

$$RR = 0.00187 \times PGV \quad (1)$$

$$Revised RR = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times 0.00187 \times PGV \quad (2)$$

지진이 발생되면 진원에서의 거리와 지진 강도를 기반으로 지반운동의 Peak Ground Velocity (PGV)와 Peak Ground Acceleration (PGA)를 산정할 수 있다. 산정된 값을 활용하여 상수도 네트워크 구성요소의 파손/파괴 여부를 결정하게 되며 이를 상수관로의 파괴확률이라 한다. ALA (2001)는 Eq. (3)과 같이 상수관로의 파괴확률산정 식을 제안한 바 있다. 여기서 Repair Rate (RR)는 관 파손 지점 수/1,000 ft의 단위를 가지고, L은 관의 길이(ft)를 의미한다. 그러나 상수도 네트워크의 지진 피해 발생 시, 공간적 상관관계에 따라 상수도 네트워크 내 인접한 관로들의 파괴확률이 서로 영향을 미칠 수 있다. 이러한 공간적 상관관계는 관로의

위치나 인접한 관로의 파괴확률에 따라 달라질 수 있으며, 이를 고려하기 위해 진앙으로부터 거리가 유사한 관로들을 공간적 상관관계를 가질 수 있도록 클러스터와 같은 묶음으로 구성할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 공간적 상관관계를 고려하기 위해 관로에 대해 군집화를 수행하였으며 동일 군집내의 관로들은 파괴확률이 유사하도록 Eq. (4)와 같이, Eq. (3)으로 결정된 각 관로의 파괴확률에 보정 계수(C_5)를 고려해 주었다. C_5 는 동일한 군집 내 파괴확률의 평균을 유지하고 분산을 줄이기 위해 Eq. (5)와 같은 식을 적용하였다.

$$P_f = 1 - e^{(-RR \times L)} \quad (3)$$

$$P_f = [1 - e^{(-RR \times L)}] \times C_5 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{If } P_{f,i,old} > P_{f,cluster\ average} & \text{ then } P_{f,i,new} = P_{f,i,old} \times (1 - A) \\ \text{If } P_{f,i,old} < P_{f,cluster\ average} & \text{ then } P_{f,i,new} = P_{f,i,old} \times (1 + A) \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 $P_{f,i,old}$ 와 $P_{f,i,new}$ 는 각각 i 관의 보정 전후 파괴확률이며, $P_{f,cluster\ average}$ 는 클러스터의 평균 파괴확률, A 는 사용자에게 의해 정의되는 보정 값이다. 본 연구에서는 문헌 분석을 통해 적절한 A (0.1%)를 적용하였으며 Eq. (5)와 같이 군집내의 파괴확률 평균을 기준으로 각 관로의 파괴확률을 보정해주었다. 만약, 평균보다 관 파괴확률이 높다면, A (0.1%)에 의해 파괴확률이 줄어들게 되며 평균보다 낮은 값의 경우 A (0.1%) 만큼 증대되는 형태가 된다. 최종적으로 본 연구에서 제안된 관로의 공간적 파괴확률 보정 흐름도는 Fig. 1과 같다.

본 연구에서는 공간적 상관관계를 고려하고자 진앙으로

Fig. 1. Flow Chart for Correction of Spatial Damage Probability of Pipes

부터의 거리 기반의 군집분석을 할 수 있는 K-means 기법을 활용하였다. K-means 기법은 자가학습이 가능한 방법으로 각 군집간의 거리차이 기반 분산이 최소화되도록 하여 K개의 군집을 형성하게 된다. X개의 다차원 데이터 집합으로 구성된 데이터의 경우 응집도를 최대로 하는 집합으로 분할한다. 일반적으로 먼저 초기 μ_i 를 설정 후, 임의의 클러스터를 구성하고, 동일한 군집내의 직선 거리를 산정하여 Eq. (6)의 V 값이 최소가 될 수 있도록 군집의 중심을 보정하는 과정을 반복하여 수행한다.

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2 \quad (6)$$

앞서 서술한 공간적 파괴확률 보정을 활용한 상수도 관로의 공간적 파괴확률 산정 절차는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2. Procedures for Calculating the Spatial Damage Probability of Pipes

2.2 상수도 네트워크 내진성능평가(예비평가) 개선

본 연구에서는 기존 상수관로 내진성능평가의 예비평가 절차를 기초로, K-water (2014)의 예비평가에서 활용되고 있는 위험도 평가 항목을 활용하고자 하였다. 관로 별 예비평가 결과로 나타나는 상대적인 중요도를 명확히 구분 지을 수 있도록 관로의 물리적 특성뿐만 아니라 수리학적 성능을 고려하고자 하였다. 이를 위해 관로의 공간적 파괴확률뿐만 아니라 수리해석과의 연계 결과를 통해 새로운 인자를 추가하여 기존 관로 내진성능평가를 고도화 하고자 하였다. 상수도시스템 내진성능평가(예비평가) 방안의 기존 방안과 본 연구에서 제안하고자 하는 수리해석 기반 취약도 평가 인자를 활용한 방안은 Table 1과 같다.

Table 1. Comparison of Seismic Performance Evaluation (Preliminary Evaluation) Plans for Water Pipes

Step	Seismic Performance Evaluation (Preliminary Evaluation) Plan	
	Existing Plan	Proposed Plan
Step 1 Seismic Index	Seismic index is determined by the magnitude of the earthquake and the type of soil, the environment of urban area in which it is classified into two groups. As a result of seismic index evaluation, vulnerabilities were evaluated for the 1 group.	
Step 2 Vulnerability Index	$VI = FLEX \times (KIND + EARTH + SIZE + CONNECT + FACIL + MCONE)$ <p>Here, VI = Vulnerability index (~70)</p> <p> $FLEX$ = Flexibility index for cross sections (~10) $KIND$ = Pipe type index (~1.0) $EARTH$ = Ground state index (~2.0) $SIZE$ = Pipe diameter index (~1.0) $CONNECT$ = Pipe joint condition index (~1.0) $FACIL$ = Index of facilities in the pipeline (~1.0) $MCONE$ = Index of treatment pipeline joints (~1.0) </p>	$VI = FLEX \times (KIND + EARTH + SIZE + CONNECT + FACIL + MCONE + FAILP + WATERLOSS)$ <p>Here, VI = Vulnerability index (~90)</p> <p>[Additional index]</p> <p>$FAILP$ = Leakage and damage probability index (Standard values may vary depending on the application area)</p> <p>$WATERLOSS$ = Average water loss index (Standard values may vary depending on the application area)</p>
Step 3 Seismic Reinforcement Judgment	If the value of the vulnerability index (VI) is 35 or higher (max. 70), it is judged as an important structure for seismic reinforcement	If the value of the vulnerability index (VI) is 45 or higher (max. 90), it is judged as an important structure for seismic reinforcement

본 연구에서 제안한 개선된 상수도 네트워크 내진성능평가(예비평가) 방안은 먼저 기존 평가 방법과 동일하게 지진도와 위험도를 평가하며 진행된다. 기존평가방법은 우선, 지진의 규모와 발생환경을 활용하여 지진도를 결정하게 되며 지진구역, 지반종류 및 도시권역을 고려하여 기존 방안과 동일한 2개의 그룹으로 분류하였다. 다음으로, 지진도 평가 결과에 의해 그룹 1로 산정된 구간에 대하여 취약도 평가를 수행하였다. 2단계는 취약도 평가로 기존 방안에서는 최대값을 1로 가질 수 있는 관로의 종류에 따른 지수, 관경에 따른 지수, 관로 이음부 상태, 관로내의 밸브 등과 같은 주요 시설물 존재 여부, 관로 이음부의 처리방법 지수의 5가지 지수와 최대값을 2로 가지는 지반상태 정도 지수 1가지, 총 6가지 지수의 합에 10점의 최대값을 가질 수 있는 단면에 대한 유연도 지수를 곱하여 총 70점 만점으로 관로의 취약도를 평가한다. 마지막으로 취약도지수(VI) 값이 70점 만점에 35점 이상인 시설물을 내진보강이 필요한 주요구조물로 판단(예비평가)하고, 상세평가를 수행하였다.

본 연구에서 제안한 취약도 평가 방법은 기존 고려된 인자에서 관로의 공간적 파괴확률지수($FAILP_{지수}$) 및 관로에서 발생되는 평균 물 손실량 지수($WATERLOSS_{지수}$)를 추가적으로 고려하였다. $FAILP_{지수}$ 는 2.1절의 방법론으로부터 도출되는 관로별 파손확률 값을 의미하며, 지진발생에 따른 감쇠효과와 관로의 물리적 특성, 매설환경 등에 따라 결정된다. 지진의 발생지점에서 가까울수록 관경의 크기가

작을수록, 액상화가 쉽게 발생할 수 있는 지반환경일수록 $FAILP_{지수}$ 는 크게 나타나게 된다. 두 번째 추가 지수인 $WATERLOSS_{지수}$ 는 지진발생에 따른 관로의 파손상태에 의한 손실량을 정량적으로 나타내는 값으로, 다수의 지진 시뮬레이션에 의해 산정된 수리학적지표인 관로의 물 손실량의 평균을 의미한다.

산출된 두 지표는 최소 및 최대값이 0과 1로 표현되는 지표로 변환하여 활용하였다. 이후, 최종적으로 취약도지수(VI) 90점 만점에 45점 이상인 시설물을 예비평가로써 내진보강 중요구조로 판단한 뒤, 상세평가를 진행한다.

새롭게 제안 및 추가한 관로 공간적 파괴확률지수($FAILP_{지수}$) 및 관로에서 발생되는 평균 물 손실량 지수($WATERLOSS_{지수}$)를 산정하기 위해 Yoo (2013)에서 개발된 REVAS.NET 모형을 수정하여 활용하였으며, 그 상세절차는 다음과 같다.

- (1) 먼저, 대표적인 수리해석 프로그램 중 하나인 EPANET2 (Rossman, 2000) 입력자료 구축을 위해 검 · 보정된 자료를 확보하고 기초자료를 구축한다.
- (2) 상수도시스템의 배수지, 펌프와 같은 수직적 구조물이 존재하는 경우 ALA (2001) 등이 제안한 취약도 곡선을 활용하고, 관로의 RR산정을 위해 보정계수(C)와 관련한 정보(관중, 관경, 매설지역, 액상화 여부)를 확보한다.
- (3) 지진의 위치와 강도를 결정하고 해당 모형의 신뢰성 확보를 위해 100,000회 이상의 지진을 발생시킨다 (Monte Carlo Simulations 활용). 본 연구에서는 내진성

능평가 결과의 비교를 위해 지진 규모를 6과 7로 설정하였으며 지진의 위치는 해당지역을 2×2 의 사각형으로 구분하여 6개 구역을 설정한 후 그 교차점에서 발생되는 것으로 설정하였다.

- (4) 지진 모의시 관로 등과 같은 상수도시스템의 파손상태를 2.1절에서 제시된 공간적파손확률 산정결과값을 활용하여 결정하고(펌프-정상운영, 관로-정상/누수/파손) 이를 EPANET2에 반영하여 수리해석을 수행하고 그 결과를 수집한다.
- (5) 마지막으로 도출된 결과를 통해 상수도 시스템의 수리학적 성능지표를 산정한다. 관로의 공간적 파괴확률지수($FAILP_{지수}$)는 군집분석과 보정계수를 활용하여 결정된 값을 활용하고, 관로에서의 평균 물 손실량 지수($WATERLOSS_{지수}$)는 Eq. (7)을 활용한다.

$$WATERLOSS = \frac{\text{Sum of water losses each pipeline}}{\text{Number of Monte Carlo Simulation}} = \quad (7)$$

3. 적용 및 결과

3.1 공간적 파괴확률 산정 결과

본 연구에서 제안한 상수도 시설물(관로)의 공간적 파괴확률 산정 방법론을 포항권 광역상수도에 적용하여 검증하였다. 포항권 광역상수도는 Fig. 3(a)와 같다. 임하댐과 영천댐으로부터 원수를 취수하여 포항권역(포항시, 경주시)에 상수(생활용수)를 공급하고 있으며, 영천댐과 안계댐으로부터 공업용수(포스코)를 공급하는 광역상수도로 전체 시설용량은 $161,200 \text{ m}^3/\text{일}$ 이다. 포항권 광역 상수도관로 파괴확률 값의 적정성을 검증하기 위한 지진으로는 2017년 11월 15일 발생한 바 있는 규모 5.4 지진을 적용하였다. 해당 지진에 의한 대규모 관파손은 보고된 바 없어, 공간적 파괴확률이 적정하기 위해서는 평균적 파괴확률이 매우 낮게 나타나야하며, 개별관의 파괴확률이 지나치게 높게 나타나는 관로가 없어야 한다. 해당 지진의 대략적인 위치는 Fig. 3(a)와 같다.

공간적 파괴확률 산정을 위한 RR의 관 매설 조건에 따른 보정 계수 $C_1 \sim C_3$ 는 Heo et al. (2015)에서 제시된 기초 자료를 토대로 적용하였다. 단 C_4 의 경우 액상화에 대한 정보를 확인할 수 없어, none(없음)으로 가정하고 모든 관로에 1.0의 값을 적용하였다. 포항시 상수도관망의 공간적 파괴확률 산정을 위하여 K-means 군집분석을 수행하였으며, 최종적으로 총 6개의 군집을 구성하였다. 군집 구성시 관의 양 끝단의 좌표를 기준으로 중심점을 관의 위치로 선정하였고 거리는 유클리디안 거리를 사용하였다. 구성된 군집은 진앙과 형성된 군집의 중심 거리 순으로 1번부터 6번까지 군집의 번호를 부여하였고, 구성된 네트워크와 군집화된 위치는 Fig. 3(b)와 같다.

(a) Applied water network input file & Earthquake location

(b) Clustering results

Fig. 3. Pohang Water Supply Network Topographic Map and Clustering Result

군집화를 수행한 후 각 군집별로 공간적 파괴확률을 적용하여 보정해주었으며, 보정 결과는 Table 2와 같다. 대체로 군집이 형성된 위치가 진앙으로부터 가까울수록(군집 번호가 낮을수록) 평균 파괴확률이 높은 것으로 나타났다. 그러나, 5번 군집의 경우 상대적으로 파괴확률이 크게 산정된 것으로 나타났다. 이는 5번 군집이 타 관로에 비해 길이가 긴 관이 있어 상대적으로 파괴확률이 높게 산정된 것으로 판단된다. 공간적 파괴확률을 보정하기 전과 후의 결과는 Fig. 4와 같다. 표준편차의 경우 $1.01 \sim 1.07\%$ 범위로 감소하였으며 보정을 수행함에 따라 파괴확률이 평균에 도달하는 것으로 나타났다. 공간적 파괴확률 적용한 후, Fig. 5와 같이 포항시 상수도관망의 관로 별 공간적 파괴확률을 분석하였다. 최대 파괴확률은 1.25%로 산정되었으며 이는 지진이 발생한 위치와 가장 근접한 우상단 11 km 길이의 관로에서 나타났다. 평균적으로 0.03% 정도의 파괴확률이 도출되었다. 또한, 지진 발생 위치와 멀어질수록 관로의 파괴확률도

Table 2. Results of Damage Probability Correction by Cluster (Spatial Damage Probability)

Cluster	Num. of pipe	Total length (km)	Before correction (%)		After correction (%)		Std. deviation change (%)
			Average	Std. deviation	Average	Std. deviation	
1	43	30478	0.062	0.199	0.062	0.197	-1.01
2	51	17840	0.021	0.037	0.021	0.036	-1.04
3	39	8717	0.012	0.02	0.012	0.019	-1.05
4	49	11484	0.012	0.017	0.012	0.017	-1.07
5	14	15044	0.046	0.091	0.046	0.09	-1.01
6	36	7333	0.009	0.013	0.009	0.013	-1.05

Fig. 4. Comparison Results for Spatial Damage Probability (Before and After)

전반적으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 좌상단에 해당하는 관로에서는 지진 발생 위치와의 거리가 있음에도 불구하고 근처 관로에 비해 파괴확률이 높은 확률을 나타내었다. 이는 해당하는 관로의 길이가 인근 관로에 비해 길어 도출된 결과로 판단된다. 즉, 지진 발생 위치와의 거리뿐만 아니라 관로의 길이 역시 파괴확률에 큰 영향이 있으며 지진 위치와 가까우며 관로의 길이가 긴 관로의 파괴확률이 높게 추정될 수 있다.

3.2 상수도 네트워크 내진성능평가 적용 결과

제안한 상수도 네트워크 내진성능평가 방안을 실제 상수도시스템에 적용하고 그 결과를 기존 방안 적용 결과와 비교분석하였다. 지진재해의 경우 규모에 따라 한번 발생하게 되면 광범위한 지역에 큰 피해를 발생시킨다. 따라서 광역상수도과 공업용상수도 시스템에 대하여 적용할 필요가 있으며 앞선 분석과 마찬가지로 포항권 광역상수도에 적용하였다. 해당 관망은 232개의 관로로 구성되어 있으며, 기본수요량 대비 해당 상수도시스템의 압력분포 현황은

Fig. 5. Schematic Diagram of Spatial Damage Probability by Pipeline

Fig. 6(a)와 같다. 평균수압의 경우 74.9 m, 최대수압의 경우 가압장의 영향으로 150 m로 나타났다. 일부 절점에서는 20 m 이하의 저수압이 발생하는 것으로 나타났지만 해당 절점은 수요가 없는 절점으로 나타났다.

본 연구에서 제안한 수도 네트워크 내진성능평가 방안의 결과와 비교분석을 위한 자료로 K-water (2015)에서 동일한 지역에 수행된 포항권 상수도 내진성능평가 결과를 활용하였다. 해당 보고서에서는 Fig. 6(b)와 같이 과거 상수도 시스템 성능평가 자료와 관 정보 등을 기반으로 6개 구간에 대해 예비평가를 수행하였다. 따라서, 본 연구에서는 해당 보고서와 동일한 6개의 동일한 구간에 대하여 예비평가를 수행하고 비교분석을 수행하였다. 6개 구간에 대한 정보는 Table 3과 같다. 지진 위치의 경우 지진 발생 깊이 등과 같은 불확실성을 고려하고자 균등분포를 가정하였다. 총 100,000회의 충분한 지진 발생 모의를 하여 결과가 통계적으로 유의성을 가지도록 하였다.

GMPE는 국내 지진데이터를 활용하여 적합하다고 분석된바 있는 Emolo et al. (2015)의 GMPE를 적용하였으며,

Fig. 6. Pressure Distribution and Selected Location of Evaluation

Table 3. Pipeline Details of Application Section

Section	Type	Diameter (mm)	Thickness (mm)
1	SP	1,800	15
2	SP	1,200	10.7
3	SP	1,100	7
4	SP	1,000	8
5	SP	900	9
6	SP	1,350	10.9

관로 수리율의 최종 계산을 위한 보정계수(C)는 공간적 파괴 확률 산정에 사용된 계수를 적용하였다. 지진 발생 후 물 공급 가능성을 판단하기 위한 최소 공급가 능한 수압은 15 m로 설정하였다.

Table 4는 포항권 광역상수도 시스템 전체의 지진 규모에 의한 공급가능성 지표 대한 결과이다.

Table 4. System Serviceability According to the Earthquake Magnitude

Magnitude	System serviceability (S_s): modification-REVAS.NET result
M6	0.968 (96.8%)
M7	0.779 (77.9%)

지진신뢰성 수리해석 수행결과 지진 규모 6이 발생한 경우 해당 시스템은 기존 수요량과 대비하여 96.8%에 달하는 물을 공급할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 단일 지진에 의해 비교적 적은 개수의 관로에서 누수/파손 등이 발생할 수 있으며, 모든 상수도시스템의 물공급 성능 상실과 같은 상황은 발생 되지 않는 것을 의미한다. 그러나 규모 7 지진이 발생할 경우 기존 수요량 대비 77.9%에 해당하는

물을 공급할 수 있는 것으로 나타나 공급계통의 특정 부분에서 단수 등과 같은 조치가 이뤄져야 할 것으로 나타났다. 물론, 수리해석의 검 · 보정 및 지진 발생 위치 등에 따라 달라질 수 있는 결과이나 향후 큰 규모의 지진 발생시 대규모 단수로 인한 피해를 방지하기 위해 이에 대한 대책을 수립할 필요가 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 지진으로 인한 피해를 확인할 수 있는 지진 규모 M7에 대하여 내진성능평가(예비평가)를 수행하였다. 제안된 내진성능(예비평가)에서 추가된 $FAILP_{지수}$ 와 $WATERLOSS_{지수}$ 의 기준은 적용 지역에 따라 변동할 가능성이 있으며, 본 연구의 적용 대상인 포항권 광역상수도의 각 추가 지수별 적용 기준은 Table 5와 같다.

Table 5. Standard Value of $FAILP$ and $WATERLOSS$

Index	Application Standard
$FAILP$	- 0.5% or less : 0.6
	- 0.5 to 1.0 : 0.8
	- 1.0 or higher : 1.0
$WATERLOSS$	- 1,500 or less : 0.6
	- 1,500 to 3,000 : 0.8
	- 3,000 or higher : 1.0

Table 6. Results of Seismic Performance Evaluation (Preliminary Evaluation) Plan

Existing Plan											
Section	<i>KIND</i>	<i>EARTH</i>	<i>SIZE</i>	<i>CONNECT</i>	<i>FACIL</i> <i>FACIL</i>	<i>MCONE</i>	<i>FLEX</i>	<i>VI</i>	order of priority		
1	1	1.5	0.6	0.5	1	1	8	44.8	1		
2	1	1.5	0.6	0.5	1	1	8	44.8	1		
3	1	1.5	0.6	0.5	0.8	1	8	43.2	5		
4	1	1.5	0.8	0.5	0.8	1	8	44.8	1		
5	1	1.5	0.8	0.5	0.8	1	8	44.8	1		
6	1	1.5	0.6	0.5	0.8	1	8	43.2	5		
Max	1	2	1	1	1	1	10	70.0			
Proposed Plan											
Section	<i>KIND</i>	<i>EARTH</i>	<i>SIZE</i>	<i>CONNECT</i>	<i>FACIL</i>	<i>MCONE</i>	<i>FLEX</i>	<i>FAILP</i>	<i>WATERLOSS</i>	<i>VI</i>	order of priority
1	1	1.5	0.6	0.5	1	1	8	0.6	1.0	57.6	1
2	1	1.5	0.6	0.5	1	1	8	0.6	0.8	56.0	2
3	1	1.5	0.6	0.5	0.8	1	8	0.6	0.6	52.8	6
4	1	1.5	0.8	0.5	0.8	1	8	0.6	0.6	54.4	5
5	1	1.5	0.8	0.5	0.8	1	8	0.8	0.6	56.0	2
6	1	1.5	0.6	0.5	0.8	1	8	0.8	0.8	56.0	2
Max	1	2.0	1.0	1.0	1.0	1	10	1.0	1.0	90.0	

본 연구에서 제시된 방법에 대한 대상구간의 예비성능 평가 결과와 기존 예비평가 결과는 Table 6과 같다. 기존 예비평가의 경우 Table 6과 같이 항목별 우선순위 선정결과 값의 변화가 거의 없었다. 최종적인 관로 위험도 값 또한 명확한 차등성이 부여되지 않은 것을 확인 할 수 있다. 이는 다양한 지수를 사용하더라도 다수의 지표가 환경에 따라 지수 값의 변화가 한 번에 반영되어 도출되는 결과인 것으로 판단된다. 이러한 점을 고려하여 수리해석에 의한 추가지표(물 손실량)를 고려함으로써 제안된 예비평가 결과가 기존보다 현실적인 위험도가 산정된 것으로 나타났다. 환경이 큰 관로의 경우 작은 관로에 비해 관 파손확률은 비교적 낮지만 파손에 의한 피해정도는 환경이 큰 관로가 더욱 크다. 따라서 파손확률과 피해(용수손실)에 대한 항목 모두 관로 내진성능 평가에 있어 매우 주요한 요소이다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 상수도 시설물 중 상수관로 내진성능 평가 예비평가 방안의 고도화를 위해 예비평가 내 관로 위험도 평가에서 공간적 파괴확률을 적용하고 수리해석 기반의 인자를 추가하였다. 제안된 방법론을 실제 운영 중인 포항권 광역상수도에 적용하고 그 결과를 분석하였다. 분석 결과 제안된 예비평가 방법이 기존 방안에 비해 상대적 중요도가 명확히 구분될 수 있는 것으로 나타났다. 제안된 상수도시스템 내진성능 예비평가 방법은 실무에서 적용 가능하도록 개발되었으며 이를 통해 과거 구조적인 분석에

만 치중된 현 상황을 개선하고 수리해석과 물 공급 안정성을 추가적으로 고려한 보다 현실적인 내진성능평가 고도화를 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002950002).

References

- American Lifelines Alliance (ALA). (2001). *Seismic fragility formulations for water systems, Part 1: Guideline*. American Lifeline Alliance, Washington, D.C., USA.
- Emolo, A., Sharma, N., Festa, G., Zollo, A., Convertito, V., Park, J.H., et al. (2015). Ground-motion prediction equations for South Korea Peninsula. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 5, pp. 2625-2640.
- Heo, J.W., Kim, D.W., Park, J.J., Kim, S.H., Lim, J.S., and Cha, Y.Y. (2015). *Seismic performance evaluation and improvement measures for Pohang waterworks facilities*. K-water Institute.
- Isoyama, R., Ishida, E., Yune, K., and Shirozu, T. (2000). Seismic damage estimation procedure for water

- supply pipelines. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, Auckland, New Zealand, January 1-4, Paper No. 1762.
- Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation (KISTEC). (2004). *Guidelines for evaluating seismic performance of existing waterworks*.
- Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation (KISTEC). (2015). *Establishment of comprehensive seismic performance evaluation procedures for waterworks facilities and S/W development*.
- K-water. (2013). *Research on improving the method of seismic performance evaluation of waterworks facilities*.
- K-water. (2014). *Tips for revising existing waterworks seismic performance evaluation*.
- K-water. (2015). *Seismic performance evaluation report for Pohang waterworks*.
- Ministry of Environment (ME). (1999). *Research to prepare seismic design standards*.
- Ministry of Construction & Transportation (MOCT). (1997). *Seismic design standard research*.
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET2 users manual*. EPA/600/R-00/057, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., USA.
- Yoo, D.G. (2013) *Seismic reliability assessment for water supply networks*. Ph.D. dissertation, Korea University.

Received	July 23, 2020
Revised	July 23, 2020
Accepted	August 3, 2020