지진방재

용수공급시스템의 지진대응 복구 시뮬레이션 모형 개발 Post-earthquake Recovery Simulation Model for Water Supply Network

이영진* · 유도근** · 이도훈*** · 배덕효**** · 강두선*****

Lee, Young Jin*, Yoo, Do Guen**, Lee, Do-Hun***, Bae, Deg Hyo****, Kang, Doosun*****

Abstract

This study proposes a computer model simulating post-earthquake recovery strategy of water supply system. Recognizing earthquake damages, water utilities have to develop restoration strategies to minimize the interruptions of water service and speed-up the recovery time. For these purposes, a computer simulation model can be helpful in evaluation of the various restoration strategies in a risk-free and virtual environment under a range of possible earthquake scenarios. The proposed simulation model can be used in conjunction with other pre-event and/or post-event loss reduction strategies for the design of robust and resilient water supply infrastructure and optimization of restoration strategies. The proposed methodology depicts the real-life restoration process thus can be used by water utilities for rapid and efficient recovery of water system under catastrophic disasters.

Key words : Restoration, Seismic hazard, Simulation model, Water supply network

요 지

지진피해를 최소화하기 위해서는 시스템의 사전 보강 및 내진설계가 선행되어야 하지만, 자연재해를 완전히 대비할 수 없는 현실을 감안하면 재해가 발생한 이후에 상실된 시스템의 기능을 최대한 신속히 복구하는 노력이 더욱 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 지진 발생 후 용수공급시스템의 신속한 대응 및 복원을 위한 컴퓨터 기반 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 지진에 의한 관 파손 및 누수, 전력차단, 기타 구조물의 파손 등을 시뮬레이션 하였으며, 정밀한 관망 수리해석을 통해 지진발생 후 시간에 따른 용수공급 시스템의 복구진행상황을 정량화하여 시간모의가 가능하도록 하였다. 개발 모형은 재해발생에 따른 시스템의 상태를 Risk-free, Virtual 환경에서 구현할 수 있어 신속한 복구를 위한 다양한 복구전략(복구순서 결정, 복구인력 배치, 용수사용량 절감 등) 수립이 가능하다. 따라서, 사후 복구 측면에서의 시스템 복원력 증진을 도모하고 실무자들의 신속한 시스템 복구대책을 마련하기 위한 중요한 의사결정 수단 (복구 소요시간 예측, 복구 소요자원 산출, 시·공간적 복구 진행상황 파악 등)으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 지진재해, 복구, 복원력, 시뮬레이션 모형, 용수공급시스템

1. 서 론

1.1 연구배경

지진은 인간의 통제가 불가능한 자연재해의 하나로 사회, 경제적으로 막대한 손실을 일으키고, 특히 지진에 의한 피해는 사회기반시설물에 크게 발생한다. 우리가 감지하지 못하는

작은 규모의 지진은 자주 발생하는 것으로 알려져 있지만, 시설물에 영향을 미칠만한 강도의 지진은 매우 드물게 발생한다. 지진재해의 특성상 일정규모 이상의 지진이 발생하였을 경우 연쇄적인 사회기반시설물의 붕괴로 인해 사회기능이 마비되는 등 그 피해가 막대하다. 우리나라의 경우, 지진 활동이 활발한 일본과 근접해 있지만 일본에 비해 지진 피해가 드물

*정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 석사과정(E-mail: youngjinlee86@gmail.com)

Member, Master student, Department of Civil Engineering, Kyung Hee Univ., Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea

**정회원, 고려대학교 공과대학 방재과학기술연구소 연구교수

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

***경희대학교 사회기반시스템공학과 교수

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

****세종대학교 토목환경공학과 교수

Professor, Department of Civil and Environment Engineering, Sejong Univ., Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul, Korea

*****교신저자, 정회원, 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수(Tel: +82-31-201-2513, Fax: +82-31-202-8854, E-mail: doosunkang@khu.ac.kr)

Corresponding Author: Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee Univ., Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea

여 지진에 대한 인식이 상대적으로 낮다고 할 수 있다. 그러나 최근 들어, 경북지역 등 국내에도 잦은 지진이 발생하고 점차적으로 지진 발생 횟수가 증가하는 추세에 있어, 지진에 대한 인식과 그에 대한 대책이 필요한 시점이다.

국내 용수공급시설물은 지진에 의한 큰 피해가 발생한 사례가 없어, 타 사회기반시설물에 비해 내진설계나 복구에 대한 관심이 낮은 실정이다. 용수공급시설물은 대부분 지중에 매설된 시설물로서 지진 등의 재해 발생 시 피해가 클 뿐만 아니라, 이에 따른 피해를 확인하거나 복구하는데 있어 상당한 시간과 노력이 요구된다. 최근 들어, 한국상하수도협회(2008)는 용수공급시설물의 재해에 의한 국내 피해사례를 조사하여 재해를 사전에 방지하고자 내진설계 기준 및 설계기준안을 제시한 연구가 진행되었다. 국립방재연구원(2005, 2008)은 비보강 조적도 건축물 및 중요시설물별로 취약도 곡선을 검토하고, 재해에 따른 사회, 경제적 영향을 고려한 알고리즘을 개발하여 통합 재해위험도 평가기술을 구축하는 등 내진설계에 대한 연구는 일부 진행되고 있지만, 재해발생 후 피해시설물에 대한 복구 방안을 제시하는 연구는 진행되고 있지 않다. “Statistics of Waterworks (Ministry of Environment, 2012)”에 따르면 전국의 상수도 보급률은 98.1%로 전년 대비 0.2%가 상승하였고, 이는 약 5,100만 명이 상수관을 통해 용수를 공급 받고 있음을 의미한다. 만일, 지진으로 인해 광범위한 구간에 걸쳐 시설이 파손될 경우에는 용수공급이 오랜 시간 중단되어 일상생활 및 산업에 미치는 영향은 상당히 클 것으로 예상된다. 따라서, 최대한 빠른 시간에 정상(혹은 정상에 가까운) 상태로 복구하기 위한 효율적인 방안이 필요하다.

현재까지 진행된 연구들을 살펴보면, 지진 등 대규모 재난 상황을 고려하여 용수공급시설의 신뢰도를 산정하거나 복구 방안을 제시한 연구는 수행된 바가 없으며, 더욱이 이를 모형화하여 적용한 사례는 전무하다. 최근 들어, 한반도에 지진발생 횟수가 증가하는 현실과 맞물려 지진 피해에 대한 우려가 증가하고 신속한 복구대책을 마련해야 한다는 필요성이 부각되고 있다. 따라서 본 연구에서는 용수공급시스템의 지진대응 복구방안과 시간에 따른 복구상황을 재현할 수 있는 컴퓨터 기반 시뮬레이션 모형의 개발 방안을 제시하고자 한다.

1.2 기존연구

2000년대에 들어, 컴퓨터 성능의 발전과 더불어 다양한 형태의 재난모의 모형들이 개발되고 있다. 대표적인 모형은 미국 Federal Emergency Management Agency (FEMA)에서 개발한 HAZUS (Hazard U.S.)모형, Mid-America Earthquake (MAE) Center에서 개발한 MAEviz 모형, 그리고 미국 Cornell 대학에서 개발한 GIRAFFE (Graphical Iterative Response Analysis for Flow Following Earthquakes) 모형 등이 있다. HAZUS 모형은 대상지역의 건물군, 지형도, 지진의 위치 및 규모, 경제관련 데이터 등을 이용하여 지진에 의한

피해규모를 추정하는 모형이다. 지진 발생에 따른 직, 간접적인 피해를 함께 산정하고 그 결과를 시각적으로 구현하는 것이 HAZUS 모형의 가장 큰 장점이다. 또한, MAEviz 모형도 비슷한 형태의 재난해석 모형으로 전력망과 물 공급망에 대한 두 시스템의 상관관계를 고려했다는 장점이 있다. HAZUS모형과 MAEviz 모형은 지진피해에 따른 전반적인 피해 규모만을 산정하는 모델로 상수관망의 상세한 특성과 수리학적 조건을 반영하지는 못하는 것으로 알려져 있다. 이를 보완하기 위한 GIRAFFE 모형은 Wang (2006), Shi (2006), Shi *et al.* (2006), Wang and O'Rourke (2007), Bonneau (2008), 그리고 Bonneau and O'Rourke (2009) 등의 연구를 바탕으로 개발된 가장 최신의 상수관망 지진재해 신뢰성 평가 모형이다. 관로 파괴 모의 시 관중 별 파괴 형태를 다양하게 구분하여 세부적인 수리해석 모의가 가능하다는 점에서 큰 장점을 지닌다. 하지만, 관 파손의 수리모의에 있어서, 관 파손에 의해 용수공급이 이루어지지 못하는 절점의 수요량을 보정하지 않고, 일부 절점에서 발생하는 부압 문제를 적절히 해결하지 못하는 단점을 지닌다. Liu *et al.* (2010, 2011)은 GIRAFFE 모형의 관로 파괴 모의와 Ballantyne *et al.* (1990)이 개발한 비정상 수리해석 시 발생 가능한 부압 처리 방법을 활용하여 새로운 모형을 개발하였다. 또한, 최근 들어 Davenport *et al.* (2006), Tabucchi *et al.* (2008), Luna *et al.* (2011) 등의 연구를 살펴보면, 지진 발생 후 용수공급시스템을 최대한 신속하게 정상상태(혹은 정상상태에 가까운 상태)로 복구하기 위한 복원력 강화에 초점이 맞춰져있다. 그러나 이들 연구는 시스템을 구성하는 관로 이외의 시설물, 즉 배수지, 펌프시설 등의 파괴 모의는 고려하지 않은 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 지진재해 발생 후의 용수공급 시스템의 거동 및 용수의 흐름 상태를 정밀한 수리해석을 통해 정량화하고, 시간에 따른 시스템의 복구상황을 최대한 실제상황에 가깝게 재현할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모형을 개발한다.

1.3 연구목적

일반적으로 지진을 포함한 재해에 대비하기 위한 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로, 초기 피해를 최소화할 수 있는 사전보강 차원에서의 내구성 강화이다. 지진에 의해 발생하는 시설물 붕괴와 같은 피해를 최소화하기 위한 방법으로, 내진설계 등을 통해 피해상황을 미연에 대비함으로써 초기에 발생 가능한 피해를 최소화한다. 두 번째 방법은, 사후 복구 측면에서의 복원력 강화이다. 즉, 재해 발생 후 비상상황에 대응한 복구전략을 수립하고, 복구 재원을 적절히 배치하여 시스템의 기능을 최대한으로 빠른 시간 내에 복원하는 방법이다. 본 연구에서는 모형개발에 있어 복원력 강화를 위한 사후복구 방안을 개발하는 것으로 연구범위를 한정하였다. 본 연구를 통해 개발하고자 하는 모형은 컴퓨터를 기반으로 한 가상 시뮬레이션 프로그램으로서, 재해 발생에 따른 시스템의

상태를 Risk-free, Virtual 환경에서 구현한다. 개발된 모형은 다양한 피해상황을 모의할 수 있으며, 여러 가지 복구 시나리오를 적용하여 가장 효율적인 시스템 복구전략을 수립함으로써 지진피해 복구를 돕기 위한 의사결정 시스템의 역할을 수행하도록 한다.

2. 지진에 의한 용수공급시스템의 피해

2.1 관 파괴와 누수

지진에 의해 관로에 발생하는 피해는 관의 파괴(breakage)와 누수(leakage)의 형태로 나뉜다. 관이 파괴된 경우는 관을 통한 용수흐름이 단절됨을 의미하고, 누수는 관 벽에 발생한 균열 혹은 관의 연결부에 생긴 틈을 통해 물이 새어 나가는 형태를 의미한다. 파손된 관으로는 용수흐름이 불가능하지만, 누수 관을 통해서 용수흐름이 부분적으로 가능하며 대신 관내 유량, 절점의 압력 등 일부 흐름특성이 변화된다.

본 모형에서는 지진발생 후 관로의 상태를 모의하기 위해 Javanbarg and Takada(2010)이 제시한 확률론적 신뢰성 모형을 적용하였다. Javanbarg and Takada(2010)은 과거 지진 복구 자료를 바탕으로 관로의 단위길이 당 수리횟수(= 수리율, repair rate)를 분석하였고, 이를 역수로 환산하여 수리지점간의 거리를 추정하였다. 통계분석 결과, 수리지점간 거리는 포아송 분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 따라서 분포형을 통해 추정된 수리지점간 거리와 각 관로의 실제 길이를 비교하여, 관 길이가 수리지점간 거리를 초과하는 경우에는 해당관로에 지진피해(파손 혹은 누수)가 발생한 것으로 판단한다. 피해가 발생한 관에 대해서는 추가적으로 0에서 1사이의 난수를 발생시켜 미리 지정한 파괴확률 80% (probability of

pipe break) 보다 클 경우 해당관은 ‘파손’, 작을 경우 ‘누수’로 구분한다. 이러한 절차를 거쳐 시스템 내 모든 관에 대해서 지진발생에 따른 피해상태를 ‘정상’, ‘누수’ 혹은 ‘파손’의 상태로 구분한 후, 이를 수리해석모형에 입력한다. Fig. 1은 각각 파손 관과 누수 관을 수리해석모형에 입력하기 위한 절차를 나타낸 모식도이다. 우선, 파손된 관을 통해 손실되는 유출량을 산정하고 이를 해당 관로의 흐름 방향의 상단 절점에 추가한 후, 파괴된 관로를 차단한다. 관로 파괴에 의해 해당관로에 연결된 수용가들은 용수공급이 중단되므로, 파손 관 양쪽 절점의 기본수요량을 연결 관의 수에 따라 적절히 삭감하여야 한다. 즉, Fig. 1(a)의 경우, 상류 절점의 수요량은 1/4 감소하고, 하류 절점의 수요량은 절점에 연결된 관의 개수가 2이므로 1/2로 감소한다. 이와 같은 작업을 거치지 않을 경우 시스템 내의 수요량이 과다 추정되게 되므로 현실적인 수리해석 결과를 얻을 수 없게 된다. 또한, 관로의 상태가 누수로 결정된 경우에는, Fig. 1(b)와 같이 해당 관을 통해 통수가 가능한 것으로 모의하며, 누수면적에 따라 누수량을 산정한 후 해당 관로의 하류단 절점에 추가한다.

본 연구에서는 관로의 손상 상태에 따라 직경별 관 복구시간을 달리 적용하였다. Chang, et al. (2010)은 식 (1)과 같이 한국수자원공사에서 제시한 경험식을 사용하였는데, 이 경험식에서 파손관의 복구시간을 관경에 대한 함수로 정의하였으며, 관경이 크면 복구 소요시간도 길어지게 된다. 이 식에서 t 는 파손 관의 복구소요시간(hr), D 는 관의 직경(mm)이다. 본 연구에서는 누수관의 복구소요시간이 파손관의 복구시간보다 2시간 적게 소요된다고 가정하였다.

$$t = \frac{D}{100} + 2 \quad (1)$$

(a) Pipe break

(b) Pipe leak

Fig. 1. Hydraulic modeling of pipe breakage and leakage.

2.2 펌프장 및 기타시설물

용수공급시스템의 경우 관로에 발생하는 직접적인 피해뿐만 아니라 전력공급의 중단으로 인한 펌프장 및 자동밸브 중단과 같은 간접적인 피해도 고려하여야 한다. 만약 펌프장이 파괴되거나 정전이 발생할 경우, 일정기간 동안의 기능저하를 초래하게 되어 용수를 각 수요지점으로 공급하지 못하게 되는 문제가 발생한다. 펌프시설 뿐만 아니라 정수장, 배수지와 같은 시설물에 피해가 발생하여 제 기능을 발휘하지 못하는 경우에도 용수공급에 문제를 야기할 수 있다. 이러한 피해상황을 간접적으로 고려하기 위해 펌프장의 운영중단 상황을 추가 모의하였다. 작동이 중단된 펌프장은 복구에 소요되는 시간을 최대 5시간으로 설정하여 모의를 수행하였다. 피해 발생확률, 복구 소요시간 등의 각종 매개변수는 해당 시스템의 특성, 과거 자료, 지진의 규모 등을 토대로 설정할 수 있다.

3. 모형의 개발

3.1 모형의 개요

지진의 발생위치와 강도, 그리고 그로 인해 시스템에 미치는 피해상황 등은 많은 불확실성을 포함한다. 다양한 지진피해상황을 모의하기 위해 확률적 모의실험에 널리 적용되는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation, MCS) 기법을 적용하였다.

을 적용하였다.

모형의 시뮬레이션 과정은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 총 여섯 단계로 이루어지며 각 단계에 대한 설명은 다음과 같다. 1 단계) 지진발생 직후 관로 및 펌프장의 피해상태를 모의한다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 지진으로 인해 발생하는 관로와 펌프시설의 피해상태가 결정되면 미국 환경청(US Environmental Protection Agency)에서 개발한 EPANET 수리해석 프로그램을 이용하여 해당지점(즉, 지진발생 직후)의 용수공급상황을 모의한다; 2단계) 시스템의 피해정도가 산정되면 필요한 복구자원을 산출하게 된다. 복구자원은 복구 소요인력 및 장비, 그리고 복구재료 등을 포함하며, 본 연구에서는 파손 및 누수관의 수리를 위한 복구인력만을 모의하였다; 3단계) 복구자원을 산출한 후 복구가 진행되기에 앞서, 복구인력의 투입 우선순위를 결정한다. 예를 들면, 용수공급량이 큰 관(일반적으로, 관경이 큰 관)을 먼저 수리하거나 혹은 공급원(정수지, 배수지, 고가수조 등)에서 가까운 관로를 우선적으로 복구하는 등의 복구계획을 수립한다; 4단계) 우선순위에 따라 시스템의 복구가 진행되면 매 시간 복구상황을 모니터링하고 복구정도를 정량화하여, 5단계) 시스템이 정상상태에 도달할 때까지 복구를 진행하게 된다; 마지막으로, 6단계) 복구가 완료되면 시간에 따른 복구진행상황을 확인할 수 있는 시스템 복원곡선을 작성하게 된다.

3.2 시스템 복원곡선

지진에 의한 관로, 배수지, 그리고 양수시설 등의 피해상태를 모의하고, 이를 수리해석모형(EPANET)에 적용하여 수리해석 결과(절점의 압력, 관내 유량 등)를 도출한다. 일반적으로 지진이 발생하면 정상상황에 비해 시스템 전반적으로 수압이 감소하고 용수흐름이 원활하지 않아, 수요절점에서 필요로 하는 수량을 제대로 공급받지 못하게 된다. 절점에서의 필요유량 대비 실제 공급 가능량의 관계를 이용하여 시스템의 복구정도를 정량화할 수 있다. 용수공급지수(System Serviceability Index)는 지진발생 후 시스템의 용수공급능력을 평가하기 위한 지표로 이용할 수 있으며 식 (2)와 같이 계산한다 (Shi, 2006; Wang, 2006).

$$S_s = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{avi,i}}{\sum_{i=1}^N Q_{req,i}} \quad (2)$$

여기서,

S_s = 용수공급지수(System Serviceability Index)

$Q_{req,i}$ = 수요절점 i 에서의 필요수량(Required nodal demand)

$Q_{avi,i}$ = 수요절점 i 에서의 실제공급가능량(Available nodal demand)

N = 시스템 내 수요절점의 수

Fig. 2. Flow chart for model simulation.

이때, 실제공급가능량(Q_{avi})은 식 (3)에 나타난 바와 같이 절점에서의 실제 압력(P_i)과 최소요구수압(P_{min})을 비교하여 산정한다. 절점에서의 압력이 최소요구수압을 만족하는 경우($P_i \geq P_{min}$)에는 필요로 하는 수량이 100% 공급되고, 만일 절점의 수압이 최소요구수압에 미치지 못하는 경우($0 < P_i < P_{min}$)에는 압력에 따라 가용수량이 변화한다. 그 밖에, 관로가 차폐되어 단수가 발생하는 절점은 압력이 0으로 계산되어, 용수공급이 이루어지지 않는다.

$$\begin{aligned} Q_{avi,i} &= Q_{req,i} & \text{if } P_i \geq P_{min} \\ Q_{avi,i} &= Q_{req,i} \times \sqrt{P_i / P_{min}} & \text{if } 0 < P_i < P_{min} \\ Q_{avi,i} &= 0 & \text{if } P_i = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

복구가 진행됨에 따라, 매 시간별 용수공급지수를 산정하여 도시하면, Fig. 3과 같은 곡선을 얻을 수 있는데, 이를 시스템 복원곡선(System restoration curve)이라 한다. 지진이 발생하는 시점(T_0) 이전에는 시스템이 100% 제 기능을 발휘하고 있다고 가정한다 - 즉, 전체 필요수량이 원활히 공급되고 있다. 지진발생 직후, 시스템의 기능은 B지점까지 저하되고, 수요대비 실제 공급가능수량이 50% 정도로 감소한다. 이후 복구 작업에 의해 용수공급이 개선되어 시간 T_1 에서 다시 재해발생 이전의 상태(혹은 정상상태)로 복구된다. 기본적인 복구전략에 의한 시스템 기능의 회복과정을 $[A \rightarrow B \rightarrow C]$ 곡선이라고 하자. 이때, 보다 효과적인 복구전략에 의해 복구시점을 C지점에서 D지점으로 단축할 수 있다면, 전체 복원곡선은 $[A \rightarrow B \rightarrow C]$ 에서 $[A \rightarrow B \rightarrow D]$ 로 이동할 것이다. 이는 효과적인 복구전략수립으로 인해 복구시간의 단축 뿐만 아니라 복구단계에서의 용수공급지수가 전반적으로 상승할 수 있음을 의미한다. Fig. 4의 음영으로 표시된 복원곡선 위쪽 면적은 용수공

Fig. 3. System restoration curve.

Fig. 4. Example for estimation of repair time.

급지수가 1보다 낮은 기간과 그 기간 동안의 용수공급지수가 동시에 반영된 값을 알 수 있다. 따라서, 음영으로 표시된 면적은 시간(hr)의 단위이고, 해당 면적이 작을수록 효과적인 복구가 이루어졌음을 의미하며, 다양한 복구전략의 정량적인 비교를 위한 지표로 사용될 수 있다.

3.3 복구 우선순위

지진 발생 직후 용수공급상황을 파악하여 시스템의 복구가 신속하게 이루어질 수 있는 복구전략을 수립한다. 예를 들어, 용수공급량이 큰 관(혹은 일반적으로 직경이 큰 관)을 우선적으로 복구하거나, 정수장, 배수지 등 용수공급원과 가까운 시설물을 우선적으로 복구할 수 있다. 또는 공공정책에 따라 병원, 공공기관 등 용수공급이 시급한 중요 시설물에 연결되어 있는 관을 우선적으로 수리하는 등의 복구 우선순위를 결정해야 한다. 복구 우선순위에 따라 복구 예상시간, 복구 소요인력, 장비, 복구재료 등을 예측할 수 있고, 시간에 따른 시스템의 전반적인 복구정도를 예상할 수 있다. 관로의 구성, 주요시설물의 분포, 인구밀집도 등 시스템의 특성에 따라 복구우선순위를 변경함으로써 보다 신속한 복구전략을 시뮬레이션 하는 것이 본 모형의 목적으로, 필요에 따라 우선순위를 변경 및 조합함으로써 보다 신속한 복구가 이루어지도록 한다.

3.4 모형의 가정

본 연구에서 개발한 모형의 개발 및 적용에 있어서 사용된 가정 및 간략화한 사항들을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구는 용수공급시스템에 국한하여 모형을 개발하였으며, 타 라이프라인시스템과의 연계는 고려하지 않았다.
- 2) 복구인력의 이동시간은 고려하지 않았다. 본 연구에서 적용한 시스템은 소규모 시스템으로 소요인력의 이동시간이 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되며, 향후 대규모 시스템의 적용에는 반드시 고려되어야 한다.
- 3) 지진 발생 시 복구에 소요되는 자원은 관 복구인력으로 한정하였으며, 다른 형태의 소요인력(감독관, 시스템 운영자

등), 복구에 필요한 장비(크레인, 트럭 등), 복구재료 등은 본 모형에서 고려하지 않았다. 보다 현실적인 모의를 위해서는 이들 자원에 대한 고려가 반드시 이루어져야 한다.

4) 피해현황 조사기간 및 복구인력의 대기시간 등은 고려하지 않았다.

5) 지진 발생 후, 모든 소요인력이 즉시 투입 가능하다고 가정하였다.

6) 관의 복구 소요시간은 파손된 관이 누수가 발생한 관 보다 2시간 더 소요된다고 가정하였다.

7) 지진으로 인한 피해는 대부분 관로에서 발생하고, 펌프 시설의 경우에는 전력 차단에 의한 일시적 가동 중지를 가정하였다. 보다 현실적인 모의를 위해서는 지진으로 인해 발생하는 구체적인 피해 정도 및 범위를 고려할 필요가 있다.

8) 용수공급시스템은 지하에 매설된 시설물이기 때문에 실제로 모든 누수 관을 찾아 복구하기까지는 상당한 시간이 소요될 것이다. 따라서 본 연구에서 산정하는 복구소요시간은 실제 소요시간과는 차이가 있을 수 있다.

본 연구의 목적은 시뮬레이션 모형을 개발하고 이를 이용하여 신속하고 효율적인 복구전략을 수립하는 것이다. 따라서, 위에 나열한 가정들로 인해 실제 상황과 일부 상이한 모의결과가 발생할지라도 여러 가지 대안을 비교, 분석하기 위한 의사결정도구로서의 역할을 수행할 것으로 기대한다.

4. 적용결과 및 분석

4.1 적용 네트워크

개발된 모형을 실제 용수공급시스템에 적용하여 복구 시뮬레이션을 수행하였다. 모형 적용에 사용된 시스템은 Fig. 5(a)와 같이 가로 8km, 세로 10km의 주거지역에 용수공급을 하

고 있으며, 총 3곳의 정수장에서 용수를 공급받고 있다(정수장은 원으로 표시). 따라서 정수장에 설치된 펌프장이 3곳, 전체 관(pipe)의 개수는 1,467개, 절점(junction)은 1,117개로 구성되어 있다. Fig. 5(a)에서 굵은 실선으로 표시된 관이 간선(transmission line)이며, 관경은 최소 150mm에서 최대 600mm로 구성되어 있다. Fig. 5(b)는 절점의 표고를 나타내는 등고선도이며 시스템 내 고도 차이는 약 15m로 평평한 지역임을 알 수 있다.

4.2 시뮬레이션 개요

서로 다른 양상의 지진피해 모의를 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 10회 반복하였다. 즉, 지진발생위치, 강도 등이 상이한 10회의 지진을 가정하여 관에 가해지는 손상(누수 및 파괴), 펌프장 전력차단양상(위치 및 중단시간) 등을 각각 상이하게 적용하였다. 각 10회의 지진에 대해 모형을 이용하여 복구모의를 수행한 결과, Fig. 6(a)와 같은 복원곡선을 산정할 수 있다. 동일한 복구방안을 적용하였지만, 피해상황이 다르기 때문에 10개의 상이한 복원곡선을 얻게 된다. Fig. 6(b)는 10개의 복원곡선을 이용하여 시간별 공급지수의 평균값과 최소, 최대값을 표현한 그래프이다. 이 그래프를 이용하면 해당 시스템의 평균적인 복구 소요시간과 시간대별 복원정도를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 10회의 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하였는데, 적절한 시뮬레이션 횟수는 해당시스템의 규모, 모의하고자 하는 지진의 규모 등에 따라 적절히 조정하도록 한다.

지진에 대응한 복구 효율성을 평가하기 위해, 다양한 복구 우선순위와 복구에 소요되는 인력의 구성 및 투입방법의 조정, 지진발생 후 실제 용수사용량 변화 등의 다양한 복구 시나리오를 구성하였다. 제안된 각 시나리오별로 실제 복구모의

Fig. 5. Study network layout and contour map.

(a) 10 random simulations

(b) Average restoration curve with confidence intervals

Fig. 6. Model estimated system restoration curves.

를 실시한 후 시간별 복구지수를 산정하여 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석에 사용되는 지수는 앞서 설명한 시스템의 복원곡선을 이용하여, 복원곡선의 위쪽부분 면적(즉, 용수공급지수가 1.0 보다 작은 곡선의 면적)과 시스템이 완전히 복구되기까지의 시간을 각각 비교하였다.

민감도 분석은 모두 3가지 경우에 대하여 실시하였다; 1) 복구 우선순위 변화에 따른 민감도 분석, 2) 복구 팀 구성 및 조합에 따른 민감도 분석, 그리고 3) 지진발생 후 용수사용량 조절에 따른 민감도 분석을 실시하였다.

4.3 민감도분석 결과

(1) 복구우선순위 민감도분석 (SA1)

관 복구의 우선순위를 어떻게 정하느냐에 따라 전체 시스템의 복구양상 및 효율성이 크게 변화할 수 있으며, 따라서, 다음과 같은 3가지 복구우선순위에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 1) 통수유량이 큰 관(일반적으로 직경이 큰 관)을 우선적으로 수리(Case 1), 2) 용수공급시설(정수장 혹은 배수지)로부터 가까운 거리의 관을 우선적으로 수리(Case 2), 그리고 3) 두 가지 경우를 조합하여 우선순위를 결정하는 방법(Case 3)을 고려하였다. Case 3은 Case1과 Case2의 두 가지 경우의 우선순위에 각 50%의 가중치를 두어 우선순위를 결정하였다.

위의 우선순위 결정 절차는 누수 관과 파손 관에 대하여 동일하게 적용하였으며, 파손 관과 누수 관의 복구가 동시에 이루어지는 경우를 고려하였다. 세 가지 Case에 대하여 각각 동일한 지진모의 10회를 수행하였으며, 그 결과는 Table 1과 Fig. 7에 정리 및 도시하였다. 모의결과를 살펴보면, 복구가 완료되기까지 평균소요시간은 약 29시간으로 세 가지 Case가 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만, 복원곡선의 면적은 Case 1이 다른 Case에 비해 좋은 결과를 나타내고 있다. 따라서, 해당 시스템의 경우에는 피해가 발생한 관로 중에서 무엇보다도 관경이 큰 관을 우선적으로 수리하는 것이 복구가 진행되는 단계에서 용수공급을 좀 더 원활하게 할 수 있

Table 1. Result of sensitivity analysis 1

Case	Average Curve Area(hr)	Average Repair time(hr)
1	6.7	29.1
2	8.1	29.4
3	7.3	28.7

Fig. 7. System restoration curves of SA1.

음을 알 수 있다. 따라서, 이후의 민감도 분석에서는 이 경우를 복구 우선순위의 기본조건으로 고정하였다.

(2) 복구인력 민감도분석 (SA2)

복구에 소요되는 인력의 투입 방법 및 조합에 관한 민감도 분석은 총 2가지 경우를 고려하였다. 1) 파손 관을 복구하는 팀과 누수 관을 수리하는 팀으로 구분하여 동시에 복구인력을 투입하는 경우(Case1), 2) 팀의 구분 없이 투입가능한 모든 인력을 동원하여 파손 관을 먼저 복구하고, 다음으로 누수 관을 수리하는 경우(Case2)이다. Case1은 파손 관과 누수 관의 복구를 동시에 진행하지만 어느 분야의 복구가 완료되면 잉여 인력은 복구가 필요한 분야로 전환되는 방식이다. 예를 들어, 파손 관의 복구가 먼저 완료되면, 파손 팀은 누수 팀을 도와 누수 관의 수리를 돕도록 한다. Case2는 파손 관의 복구에

Table 2. Result of sensitivity analysis 2

Case	Average Curve Area(hr)	Average Repair time(hr)
1	6.7	29.1
2	7.4	28.4

Fig. 8. System restoration curves of SA2.

우선순위를 두어 파손 관의 복구가 완료된 후, 누수 관을 복구하도록 한다.

두 가지 Case에 대하여 총 10회의 지진 모의를 실시한 결과는 Table 2와 Fig. 8과 같다. 결과를 살펴보면, 복구가 완료될 때까지 평균소요시간은 두 경우 유사하거나 Case2가 0.7시간 빠른 것으로 나타났다. 흥미로운 결과는 복원곡선의 모양에서 나타나는데, Case1의 경우 복구 초기에는 공급지수가 감소하지만, 5시간 이후 크게 증가하여 이후의 시간에는 Case2 보다 원활한 용수공급능력을 보여준다. 복구 초기에 공급지수가 감소하는 이유는 누수관의 수리를 위해 관로를 차단하기 때문이며, 이 후 피해관의 복구가 진행됨에 따라 서서히 증가하는 추세를 나타낸다. 반대로 Case2의 경우, 복구 초기에는 Case1에 비해 나은 결과를 보이다가 복구개시 후 7~11시 사이에 공급지수가 감소하였다가, 이후 증가하는 양상을 보인다. Case2의 경우 파손관의 복구가 완료되고 누수관의 수리가 시작되는 시간대가 대략 7~11시 사이이기 때문에 일시적으로 누수관의 차단에 따른 공급지수의 감소현상이 나타나고 이후 가파르게 상승한다. 따라서, 해당시스템의 경우 복구팀을 구분하여 동시에 투입하는 것이 보다 효율적인 복구방안이 될 것으로 판단된다. 이후 민감도분석에서는 이 경우를 복구인력 투입의 기본조건으로 고정하였다.

(3) 용수사용량 민감도분석 (SA3)

지진이 발생하여 용수공급이 원활하지 못한 상황에서는 용수사용량을 절감하도록 유도하는 방안이 검토되어야 한다. 절점의 용수사용량을 임의로 조정하였을 때, 복구단계에서의 용수공급지수에 미치는 영향을 분석하였다. 용수사용량의 변동이 없는 경우(Case 1)를 기본조건으로 하여 용수사용량을 10% 감소(Case2), 20% 감소(Case3), 그리고 30% 감소

Table 3. Result of sensitivity analysis 3

Case	Average Curve Area(hr)	Average Repair time(hr)
1	6.7	29.1
2	6.5	29.1
3	6.4	29.1
4	6.3	29.1

Fig. 9. System restoration curves of SA 3.

(Case4) 하는 등 총 4가지 경우를 고려하였다.

동일한 지진모의 10회를 수행하였고, 평균한 결과는 Table 3과 Fig. 9와 같다. 복구 우선순위와 복구인력 투입방법은 동일하기 때문에 복구가 완료되기까지의 소요시간은 네 가지 Case가 모두 동일하게 산정되었음을 알 수 있다. 복원곡선의 면적은 용수사용량을 절감함으로써 감소하며 이는 용수공급이 좀 더 원활해짐을 의미한다. 실제로 절점에서의 용수사용량을 감소시키면, 시스템 내 손실수두가 감소하고 전반적으로 수압이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 시스템의 수압이 증가하면 더 많은 사용자에게 용수공급이 가능해지고, 따라서 가용한 공급수량이 늘어나 용수공급지수가 증가하게 된다. Fig. 9에 나타난 바와 같이, 복원곡선의 형태는 동일하지만, 사용량을 저감하였을 때 매시간 공급지수는 상승하였음을 확인할 수 있다. 따라서, 지진과 같은 재해 상황에서는 홍보를 통해 수요자로 하여금 물 사용량을 절감하도록 유도하거나 제한급수를 실시함으로써 가용한 용수공급 범위와 수량을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 시, 공간별 복구 양상

앞서 살펴본 시스템 복원곡선은 시간대별 평균적인 복구양상을 파악하는데 도움이 된다. 시스템의 복구상황을 보다 면밀히 파악하기 위해서는 공간별 복구상황을 파악하는 것이 중요하다. Fig. 10은 복구개시 후 시간대별 관로 및 시설물 피해상황, 복구진행상황, 절점별 용수공급지수 등을 공간에 대해 도시한 그래프이다. Fig. 10(a)의 경우, 지진 발생 직후 ($t=0$) 파손 관, 누수 관, 그리고 펌프장 작동 여부 등 시스템의 초기 피해상태를 파악할 수 있다. 복구가 진행됨에 따라, 피해

Fig. 10. Spatiotemporal restoration contour map.

가 발생한 관의 보수가 이루어지고 용수공급이 원활해져, 24 시간이 경과한 후에는 Fig. 10(d)와 같이 시스템 전체 수요량의 약 88%가 공급가능하게 됨을 확인 할 수 있다. 이 그래프를 통해 관로 및 시설물의 피해 발생위치, 공간적인 복구 진행상황, 시간대별 용수공급 취약지역 파악 등의 공간적인 분석이 가능하며, 이를 통해 보다 효율적인 복구전략 수립이 가능하다.

5. 결 론

본 연구에서는 지진발생에 따른 용수공급시스템의 피해상

황을 모의하고, 정밀한 수리해석을 통해 시간별 복구과정의 모의가 가능한 컴퓨터 기반의 시뮬레이션 모형을 제안하였다. 개발된 모형은 다양한 지진발생 시나리오의 모의가 가능하고, 다양한 복구전략 옵션(복구 우선순위, 복구인력배치, 용수사용량 절감 등)을 포함하여 시스템의 신속한 복구를 돕기 위한 의사결정 시스템의 역할(복구 소요시간 예측, 복구 소요자원 산출, 시·공간적 복구 진행상황 파악 등)을 수행할 수 있다. 개발 모형을 실제 상수관망시스템의 가상 지진복구모의에 적용하였으며, 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용한 다양한 민감도 분석을 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 파손 시설물의 복구에 따른 시·공간별 용수공급시스템

의 기능 복원상태를 정량적으로 평가하기 위해서, 절점에서의 가용공급수량을 수리해석을 통해 산정하였다. 가용수량 대비 필요수량을 용수공급지수(serviceability index)라 하며, 시간별 용수공급지수를 계산하여 시스템 복원곡선(restoration curve)을 도출하였다. 복원곡선의 면적과 복구소요시간은 다양한 복구 시나리오의 비교, 분석을 위한 정량적인 지표로 활용하였다.

2) 적용 시스템의 민감도분석 결과를 요약하면, 가) 복구 우선순위에 있어서는 통수유량이 큰 관을 우선적으로 복구하는 것이 유리하였고, 나) 복구인력의 투입은 파손 관과 누수 관을 구분하여 동시에 복구를 실시하는 것이 우수한 결과를 보였으며, 다) 재난상황에서는 용수사용량의 절감을 유도하거나 제한함으로써 복구기간동안 용수공급 가용인구수와 범위를 늘릴 수 있을 것으로 판단되었다.

3) 현재 개발된 모형은 많은 가정과 간략화라는 한계를 안고 있다. 보다 실제상황에 가까운 모의를 위해서는 앞서 언급한 가정 사항들을 반영하여 모형을 개선할 필요가 있으며, 향후연구를 통해 지속할 계획이다.

4) 최종적으로는 사전보강을 위한 내진설계방안을 포괄하고, 타 라이프라인시스템(도로, 교통, 전력 등)과의 연계를 고려한 통합 지진대응모형을 개발하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 1) 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2013R1A1A1060726)이며, 동시에 2) 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행된 연구입니다. 이에 감사드립니다.

References

- Ballantyne, D.B., Berg, E., Kennedy, J., Reneau, R., and Wu, D. (1990) Earthquake Loss Estimation Modeling of the Seattle Water System. Technical Report, Kennedy/Jenks/Chilton, Federal Way, WA.
- Bonneau, A.L. (2008) "Water Supply Performance During Earthquakes and Extreme Events." Thesis (PhD). School Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, New York.
- Chang, Y., Kim, J., and Jung K. (2010) A study on the design and evaluation of connection pipes for stable water supply. Journal of Korean Society of Water and Wastewater, Vol. 26, No. 2, pp. 249-256.
- Davenport, P.N., Lukovic, B., and Cousins, W.J. (2006) Restoration of Earthquake Damaged Water Distribution Systems. Proceedings of New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Conference 2006.
- Javanbarg, M.B. and Takada, S. (2010) Seismic reliability assessment of water supply systems. Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, London, 3455-3462.
- Korea Water and Wastewater Works Association (2008) Study on Disaster Prevention Measures for Water Supply Facilities. Ministry of Environment.
- Liu, G.Y., Chung, L.L., Yeh, C.H., Wang, R.Z., Chou, K.W., Hung, H.Y., Chen, S.A., Chen, Z.H., and Yu, S.H. (2010) A Study on Pipeline Seismic Performance and System Post-Earthquake Response of Water Utilities. Technical Report MOEA-WRA-0990095, Water Resource Agency, MOEA, Taipei.
- Liu, G.Y., Chung, L.L., Huang, C.W., Yeh, C.H., Chou, K.W., Hung, H.Y., Chen, Z.H., Chou, C.H., and Tsai, L.C. (2011) A Study on Pipeline Seismic Performance and System Post-Earthquake Response of Water Utilities (2/2). Technical Report MOEA-WRA-1000090, Water Resource Agency, MOEA, Taipei.
- Luna, L., Balakrishnan, N., and Dagli, C.H. (2011) Post-earthquake Recovery of a Water Distribution System: Discrete Event Simulation Using Colored Petri Nets, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, Vol. 17, No. 1, pp. 25-34.
- Ministry of Environment (2012) "Statistics of Waterworks", Ministry of Environment: Drinking Water and Sewerage Bureau.
- National Institute for Disaster Prevention (2008) Development of the Seismic Fragility Function for Unreinforced Masonry Buildings. Report No. NIDP-PR-2008-02-01, National Emergency Management Agency, Korea.
- National Institute for Disaster Prevention (2005) Study on the Algorithm for Seismic Risk Assessment. Report No. NIDP-PR-2005-03-02, National Emergency Management Agency, Korea.
- Shi, P. (2006) "Seismic response modeling of water supply systems." Thesis (PhD). Ithaca, NY: Cornell University.
- Shi, P., O'Rourke, T.D., and Wang, Y. (2006) Simulation of Earthquake Water Supply Performance. *Proceeding of 8th National Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 8NCEE-001295, EERI, Oakland, CA.
- Tabucchi, T., Davidson, R., and Brink, S. (2008) Restoring the Los Angeles Water Supply System following an Earthquake. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Beijing, China, October 12-17.
- Wang, Y. (2006) "Seismic performance evaluation of water supply systems." Thesis (PhD). Ithaca, NY: Cornell University.
- Wang, Y. and O'Rourke, T.D. (2007) Characterizations of seismic risk in Los Angeles water supply system. China-Japan-US Symposium on Lifeline Earthquake Engineering.

Received	December 30, 2014
Revised	January 13, 2015
Accepted	February 2, 2015