



지진발생 대응을 위한 상하수도시설 관리 및 기술 현황에 대한 고찰

A review on recent advances in water and wastewater treatment facilities management for earthquake disaster response

박정수¹·최준석²·김극태³·윤영한²·박재형^{4*}

Jungsu Park¹·June-Seok Choi²·Keugtae Kim³·Younghan Yoon²·Jae-Hyeoung Park^{4*}

¹국립한밭대학교 건설환경공학과, 대전광역시 유성구 동서대로 125, 34158

²한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223

³수원대학교 환경에너지공학과, 경기도 화성시 봉담읍 와우안길 17, 18323

⁴지앤씨환경솔루션, 서울특별시 마포구 성미산로23길 16-5, 03979

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Republic of Korea

²Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

³Department of Environmental & Energy Engineering, The University of Suwon, 17, Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 18323, Republic of Korea

⁴G&C Environmental Solution, 16-5, Seongmisan-ro 23-gil, Mapo-gu, Seoul 03979, Republic of Korea

pp. 001-008

pp. 009-021

pp. 023-033

pp. 035-043

pp. 045-052

pp. 053-060

pp. 061-073

pp. 075-083

ABSTRACT

The proper operation and safety management of water and wastewater treatment systems are essential for providing stable water service to the public. However, various natural disasters including floods, large storms, volcano eruptions and earthquakes threaten public water services by causing serious damage to water and wastewater treatment plants and pipeline systems. Korea is known as a country that is relatively safe from earthquakes, but the recent increase in the frequency of earthquakes has increased the need for a proper earthquake management system. Interest in research and the establishment of legal regulations has increased, especially since the large earthquake in Gyeongju in 2016. Currently, earthquakes in Korea are managed by legal regulations and guidelines integrated with other disasters such as floods and large storms. The legal system has long been controlled and relatively well managed, but technical research has made limited progress since it was considered in the past that Korea is safe from earthquake damage. Various technologies, including seismic design and earthquake forecasting, are required to minimize possible damages from earthquakes, so proper research is essential. This paper reviews the current state of technology development and legal management systems to prevent damages and restore water and wastewater treatment systems after earthquakes in Korea and other countries. High technologies such as unmanned aerial vehicles, wireless networks and real-time monitoring systems are already being applied to water and wastewater treatment processes, and to further establish the optimal system for

Received 29 October 2019, revised 3 December 2019, accepted 17 December 2019.

*Corresponding author: Jae-Hyeoung Park(E-mail: gncenvsol@naver.com)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

earthquake response in water and wastewater treatment facilities, continuous research in connection with the Fourth Industrial Revolution, including information and communications technologies, is essential.

Key words: Earthquake, Information and communications technologies, Water and wastewater treatment facilities, Disaster response, Water supply

주제어: 지진, 정보통신기술, 상하수도시설, 재난대응, 용수공급

1. 서 론

자연재난은 인간의 생활에 다양한 영향을 미쳐 왔으며, 최근 기후변화 등에 따른 강우량 변화, 태풍, 지진발생 등 다양한 자연재난이 상하수도 공급 시스템에 미치는 영향에 대한 국내외 관심이 커지고 있다 (Chou et al., 2014; Ho et al., 2019; Park et al., 2018). 이러한 재난이 먹는물의 공급 및 하수의 수거 등과 관련된 상하수도 시스템에 미치는 영향에 대한 학술적 연구는 많지 않은 실정이지만, 우리나라에 비해 지진 등 자연재난이 많이 발생하는 미국, 일본 등에서는 상대적으로 일찍부터 관련 연구가 계속되어왔으며(Matthews, 2015) 특히 상하수도 시설의 위기발생에 대한 대응 능력의 확보와 안정적인 시스템 운영방안 등에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다 (Asefa et al., 2014; Hoque et al., 2012; Matthews, 2015; Sweetapple et al., 2018). Davis et al. (2012)는 1994년 LA 대지진 발생시 상수도 시스템에 미친 영향과 회복과정에 대한 분석을 통해 지진후 상수도 시스템의 복원 관점에서 물관련 서비스 기능을 물공급 시스템 관리, 수질관리, 수량관리, 화재방지 및 기능성 관리의 5가지 요소로 구분하고, 지진 이후 각 분야 물관련 서비스 기능을 정상단계로 회복하기 위한 시스템 구성과 각 요소 간 상과관계 등을 분석하였다 (Davis, 2014; Davis et al., 2012). Matthews (2015)는 기존의 연구 사례를 정리하여 상하수도 시설의 재난에 대한 회복력 혹은 대응능력을 수도물의 공급시스템, 하수 수집시스템, 구조물의 유지, 전력공급의 4가지 분야로 구분하여 대부분의 극한상황에서도 시스템이 정상적으로 작동할 수 있는 상단계(High level)부터, 사고발생시 단수 등 시스템 운영 중단가능성이 높은 하단계(Low level)까지 상중하의 3단계로 각각 구분하여 제시하였다 (Bevington et al., 2011; Chisolm, 2007; Cimellaro et al., 2010; Lee et al., 2013). 최근에는 Sweetapple et al. (2018)가 재난에 의한 시스템 운영의 위험도, 회복성, 신뢰성 간의 상관관계 등을 분석하고 이를 정량화하여 관리할 수 있는

방안을 제시하였다.

우리나라는 1978년 이후 현재까지 약 1860번의 규모 2.0 이상의 지진이 발생해 왔으나, 대규모 지진의 발생은 많지 않아 상대적으로 지진에 대한 관심은 높지 않았다. 하지만 2016년 9월 12일 경주지역에서 1978년 기상청 관측이후 최대인 규모 5.8의 지진이 발생하였으며, 1978년 이후 총 10회의 규모 5.0 이상의 지진 중 4회가 2016년 이후 집중해서 발생하면서 (KMA, 2019) 우리나라가 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 인식이 확산되었다. 또한 1978~2015년까지 규모 2.0 이상 지진 발생 횟수가 약 1200회로 연평균 약 30회 정도의 빈도로 발생한 반면 2016년부터 2019년 9월까지의 지진발생횟수는 약 650회로 연평균 약 170회 이상의 빈도로 발생하여 실질적인 지진발생 증가가 관찰되고 있다 (KMA, 2019).

국민의 생활과 직결되는 상하수도시설의 관리는 매우 중요하며, 우리나라에서는 환경부 등을 중심으로 다양한 재난에 대한 대응매뉴얼을 작성하여 관리하고 있다. 2005년 대통령 훈령인 국가위기관리기본지침에 의해 ‘식용수분야 위기대응 실무매뉴얼’이 제정된 바 있으며, 이후 지속적으로 개정되어 2016년 재난발생시 기관 별 업무분장, 사고발생이후 상황종료시까지의 표준절차, 세부 대응 내용 등 현실적인 대응 사항을 포함하고 환경부와 국토교통부가 공동으로 관리하는 매뉴얼로 제정되어 관리되고 있다 (MOE and MOLIT, 2016). 이 매뉴얼의 주요 세부 내용은 재난에 따른 수질사고발생시 오염발생의 억제 및 제거 등과 관련된 실무적인 행정적 대응체계와 현장 대응 업무 등을 포함하고 있다.

상하수도 시스템 기능의 유지는 국민이 재난상황에서도 정상적인 생활을 유지하는데 중요한 요소이며, 특히 새롭게 대두되는 지진, 기후변화에 따른 이상 기상현상 등에 따른 피해가 발생한 이후에는 빠르게 시스템을 복구하기 위한 노력이 필요하다 (Hao et al., 2012; Matthews, 2015; Sterling et al., 2010). 우리나라에는 이러한 자연재난에 대응하기 위해 관련부처를 중심으로 실



무매뉴얼의 작성 등을 통해 대응 체계를 마련하고 있으나, 자연재난을 극복하기 위한 기술의 개발 및 과학적 대응을 위한 연구 등은 상대적으로 활발하지 않은 실정으로 향후 해외사례 등에 대한 조사와 최근 빠르게 발전하고 있는 4차 산업 기술 등을 활용하여 우리나라 실정에 맞는 재난관리 기술의 개발을 위한 노력이 필요하다.

본 연구에서는 자연재난, 특히 최근 발생빈도가 높아지고 있는 지진의 발생이 상하수도시설에 미치는 영향 및 대응과 관련된 국내외 연구 현황을 분석하고 향후 과학적이고 체계적인 재난관리를 위한 기술개발 방향 등을 제시하였다.

2. 국내 상하수도시설의 지진대응 체계

2.1. 자연재난 분류

Park et al. (2018)은 자연재난에 의한 화학물질사고 관련 사업장의 안전관리를 위한 연구를 통해, 화학물질의 저장소인 탱크와 이송을 위한 파이프 등에 영향을 미치는 자연재난의 종류로 지진, 태풍, 홍수, 낙뢰, 이상기온 등을 제시하였다. 그 외 해일, 화산폭발과 같은 자연재해와 원자력 발전소의 사고와 같은 인공적 재난도 또한 환경에 중요한 영향을 미치는 재난이다 (Chou et al., 2014). 이러한 자연재난은 상하수도 시설에 직접적인 영향을 미칠 뿐 아니라 재난으로 인한 유해물질 저장소의 파손에 따른 유해화학물질 유출 등 2차적인 문제를 발생시킬 수도 있다 (Park et al., 2018). 또한 최근 건축물의 고층화와 information and communications technologies(ICT) 기반 첨단 전자 기기들의 설치가 늘어나면서 낙뢰에 의한 피해도 점차 늘어가는 추세로 관련 연구에 대한 관심도 점차 높아지고 있다 (Kim et al., 2015).

다양한 자연재난이 상하수도시설에 영향을 미칠 수 있으나, 최근 우리나라의 재난관련 정책수립 및 연구는 주로 기후변화에 따른 국지성 집중호우 등 강우패턴 이상과 매년 반복되는 태풍 그리고 특히 최근 관심이 높아지고 있는 지진대응에 집중되고 있다.

2.2 지진대응을 위한 요소기술

2.2.1 내진기술

지진의 경우 피해가 발생된 경우 피해범위 및 영향

이 크고 복구에도 많은 비용과 노력이 수반되므로 발생전 사전대책의 마련이 중요하다 (Hyun et al., 2017). 해외의 지진에 의한 환경기초시설 피해사례의 경우 내진설계가 상대적으로 약했던 1980년대와 내진기준이 강화된 1990년대 이후의 자료를 비교해보면 내진설계가 상수도 시설의 피해발생 감소에 도움이 되었음을 확인할 수 있다 (MOE, 1999). 1980년대에서 1990년대까지 미국과 일본의 지진에 의한 상수도시설 피해 사례를 보면 지반액상화에 따른 배수관 파열 사고가 다수 발생했으며, 그 외 정수장 펌프, 발전기 등 기계장치의 피해와 건물의 균열발생 등도 보고되었다 (Fig. 1) (MOE, 1999).

우리나라에서 지진에 대한 관심이 높아진 것은 비교적 최근의 일이지만 지진에 대한 대비는 과거부터 지속되어 왔다 (Hyun et al., 2017; MOE, 1999; Park et al., 2013). 현재 우리나라에서는 지진·화산재난대책법에 의해 내진설계기준을 적용해야할 시설물을 지정하고 있으며, 하천법에 따른 국가하천의 수문, 댐건설 및 주변지역 지원 등에 관한 법률에 의한 다목적댐, 하수도법에 따른 공공하수처리시설, 수도법에 따른 수도시설, 물환경보전법에 따른 산업단지공공폐수처리시설 등의 시설이 포함되어 있다.

우리나라 건축물에 내진설계가 적용된 것은 1988년 멕시코 지진 이후로 이후 순차적으로 도로, 철도 등에 내진설계를 적용하였으며, 1996년 제정된 자연재난대책법에 의해 수도시설 등에도 내진설계기준을 적용하고 있다 (Kim, 2017).

환경부에서는 1999년 ‘상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구’의 수행을 통해 국내외 지진현황, 외국의 대응 사례 등을 바탕으로 국내 상수도 시설의

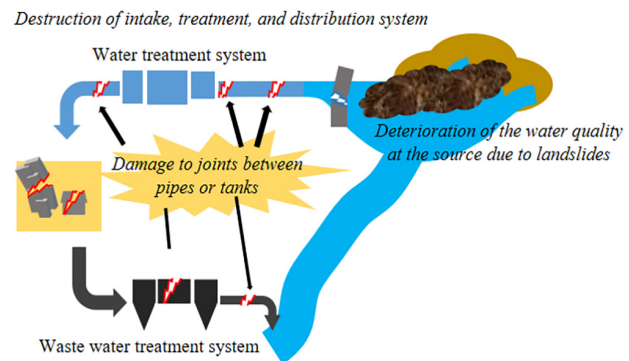


Fig. 1. Schematic of possible earthquake effects on water and wastewater treatment facilities.

pp. 001-008

pp. 009-021

pp. 023-033

pp. 035-043

pp. 045-052

pp. 053-060

pp. 061-073

pp. 075-083

내진설계의 기본방향과 기준 등을 정립하였으며, 이를 바탕으로 2010년 상수도시설기준에 지진시 상수도 시설의 급수기능을 확보하고 2차 재난을 발생시킬 가능성을 최소화하기 위한 내진성능의 확보에 필요한 최소설계 요건을 포함하였다 (KWWA, 2010, 2017). 이후 한국수자원공사는 2014년 지반액상화에 대한 보강 대책 등을 포함한 내진성능 평가관련 개정 요령을 자체적으로 수립하였으며, 한국시설안전공단에서는 관로와 지하 맨홀을 대상으로 수립된 기존의 상수도 내진성능 평가 요령을 개선하여 다양한 복합시설물의 내진성능을 합리적으로 평가 할 수 있는 절차를 제시하는 등 관련 연구가 계속되고 있다 (KISC, 2015; KISTC, 2004; KWWA, 2017).

하수도의 경우 상수도 시설에 비하여 내진관련 기준의 마련이 상대적으로 늦게 진행되었다. 2008년 지진재난대책법에 하수도 시설을 내진설계기준 적용대상 시설로 설정했으며, 이후 2009년 환경부의 “하수도 시설 내진기준 마련을 위한 연구”를 통해 하수도 시설의 내진설계 성능기준이 정리되고, 2011년 하수도 시설기준에 내진성능확보를 위한 최소설계요건이 포함되게 된다 (KWWA, 2011, 2017; MOE, 2009). 우리나라의 경우 실질적으로 지진발생이 하수시설에 영향을 미친 사례가 많지 않아 2009년 환경부의 하수도시설 내진기준 마련 연구에서는 해외의 사례를 참고했다. 특히 일본의 사례를 들어 수도 및 전기 등 다른 사회기반시설에 비해 복구 우선순위는 낮으나, 하수도 시설의 복구가 이루어지지 않으면 상수 사용이 제한 적일 수밖에 없어 복구절차의 한계인자로 작용하는 것과 자연유하가 기본인 하수도 시설의 특성상 관로내 역경사 발생시 관망 전체에 이상이 생길 수 있음 등을 지진발생에 대한 하수도 시설 피해의 특성으로 제시하였다 (MOE, 2009).

우리나라의 내진등급은 시설물의 중요도에 따라서, 내진 특등급, 내진 I등급 및 내진 II등급으로 구분되며, 상수도시설은 내진 I등급, 하수도 시설은 내진 II등급으로 구분하는 것을 원칙으로 하되(KMLIT, 2018; MOE, 2009) 하수도 시설의 방류수역내에 상수원보호구역, 수변구역 등이 존재하여 지진발생시 중대한 2차 피해가 우려될 경우 하수도 시설에도 내진 I등급을 적용하도록 하고 있다 (KWWA, 2011). 시설물의 내진성능수준은 기능수행수준, 즉시복구수준, 장기복구/인명보호수준과 붕괴방지수준으로 분류되며 설계시 시설

물의 중요도에 따라 요구되는 내진성능수준을 만족해야 하고, 또한 설계지반의 운동 수준을 50년부터 4,800년의 평균재현주기로 구분하여, 시설물의 설계시 평균재현주기와 내진성능수준의 조합으로 최소 내진성능목표를 만족하도록 규정하고 있다 (KMLIT, 2018). 또한 지진구역을 구분하여 강원 북부 및 제주 지역을 지진구역 II구역으로 지정하고 그외 전국 대부분을 I구역으로 지정하고 있다 (KMLIT, 2018). 지진구역 I구역과 II구역에서 평균재현주기 500년에 해당하는 지진의 지반운동에 의한 최대지반가속도를 중력가속도(g)로 나눈 지진구역계수(Zone factor)는 0.11 및 0.07로 각각 규정되어 있으며 내진설계시 시설물의 분류와 내진등급, 내진성능수준, 설계지반운동 수준 등을 포함하도록 권장되고 있다 (KMLIT, 2018).

우리나라에서도 지진대응의 필요성에 대한 공감대는 이미 널리 형성되어 있으며 최근 지진과 관련된 다양한 기준 등이 정립되고 있으나, 아직까지 상수도 시설의 경우 다른 국가 시설물에 비해 상대적으로 내진관련 기준의 수립 등이 미흡한 실정이며, 향후 실효성 있는 지진대응을 위해 법령에 따라 혼재되어 있는 상하수도 시설의 내진관련 기준을 통일해야할 필요성이 제시되고 있다 (Kim and Cho, 2019). 예를 들어, 현재 우리나라에서는 하나의 시설물에 토목시설물과 건축물이 혼재되어 있는 경우 하나의 구조물에서도 일부는 건축구조기준을 다른 일부는 토목시설기준을 따르고 있어 일관성 있는 내진성능 확보를 어렵게 하고 있으며, 이의 개선을 위한 지속적인 노력이 필요한 실정이다 (Kim and Cho, 2019).

직접적인 상하수도 시설뿐 아니라 원수를 공급하는 주요 공급원중 하나인 댐에 대한 관리도 함께 이루어질 필요가 있다. 다량의 물을 저류하고 상수원의 원수와 공업 및 농업용수를 공급하는 댐은 지진으로 인한 피해가 발생할 경우 하류지역에 막대한 영향을 줄 수 있는 시설물로 상하수도시설에 비해 상대적으로 일찍부터 내진설계의 개념이 도입되어왔다 (Cho and Kim, 2018). 댐은 내진설계 개념이 도입된 최초의 대형 구조물로, 우리나라에서는 1993년부터 댐 건설시 내진설계를 적용하였으며, 이후 수차례에 걸쳐 내용을 보완하여 2017년 제정된 내진설계기준 공통적용사항을 반영한 댐 내진설계 기준이 2019년 개정되는 등 지속적인 관리가 이루어져 왔다 (Kim, 2017; MOE, 2019). Cho and Kim (2018)은 향후 지진에 대비한 안정적 댐



운영을 위해 댐 본체뿐 아니라 부속시설에 대한 명확한 설계 절차의 규정과 우리나라에 많이 건설된 표면차수벽형 댐의 진동발생시 거동 분석에 대한 필요성을 제시하였다.

2.2.2 지진대응 지침

2015년 국민안전처 조사결과에 따르면 2,568개의 국내 상수도시설중 40%가 넘는 1,106개 시설에 내진보강이 필요한 것으로 분석되었으며, 특히 지진에 따른 지반 변형에 의한 시설물 파괴 등에 대한 대응책 마련의 필요성이 제시되었다 (Hyun et al., 2017; KMPSS, 2015; Lee, 2016a). 지진발생에 대한 대응대책으로 지진에 따른 비상급수대책과 국민행동요령 등을 수립하고 있으나, 비상급수대책의 경우 비상시 실질적 용수공급을 수행할 수 있는 시설물의 확보는 미흡한 실정이다 (Hyun et al., 2017). 비상시 국민행동요령의 경우 국민재난안전포털에 태풍과 지진 등 자연재난 18개 분야에 대한 행동요령을 제시하고 있으나, 지진관련 내용은 지진발생시 대피방법 등이 주요 내용으로 먹는 물의 오염 등과 관련된 지침은 마련되어 있지 않으며, 지진발생시 유해한 화학물질을 다량 보관하고 있는 산업단지의 사고발생에 따른 2차적인 수질오염 등에 대한 대응대책도 미흡한 실정으로 보다 체계적인 대응대책의 마련이 필요한 실정이다 (Hyun et al., 2017).

2.2.3 지진발생 예측기술

지진에 따른 피해를 최소화하기 위해 지진발생에 대한 사전예측은 매우 중요하며 전세계적으로 다양한 연구가 진행되어왔다. 지진예측방법은 지각의 변동, 수리학적 특성의 변동, 전자기장변화 등 지진발생을 미리 알 수 있는 전조 현상을 분석하는 방법, 지진파장의 속도 변화를 모니터링해서 지진발생을 예측하는 방법 등이 있으나 아직까지 지진의 정확한 예측, 특히 단기 예측은 쉽지 않은 실정이다 (Cicerone et al., 2009; Geller, 1997; Lee et al., 2017; Rikitake, 1979; Wang et al., 2006). 수위 저하 등 지하수의 변화를 모니터링하여 지진발생을 예측하는 기술도 이러한 예측 기술 중 하나로 미국, 중국, 일본 등에서 최근까지도 꾸준히 연구가 계속되고 있으며, 우리나라에서도 경주지진 발생 이후 관련분야 연구에 대한 관심이 높아

지고 있다 (Horton Jr and Williams, 2012; Koizumi, 2013; Lee, 2016b; Lee et al., 2017). 이러한 기술은 지하수 수위 및 수질의 변화에 대한 세밀한 모니터링과 분석이 필요하며, 이를 위해 지하수 변화의 체계적 관측이 가능한 모니터링 시스템 구축의 필요성이 제시되고 있다 (Lee et al., 2017).

2.2.4 관망에 미치는 영향 예측 및 관리 기술

지진의 발생은 지하에 매설된 상수도 관망에 물리적 훼손 및 이에 따른 누수를 발생시킬 수 있어, 지진발생에 따른 피해규모의 예측과 원활한 피해 복구 등을 위해 지진발생이 관망시스템에 미치는 영향에 대한 연구가 계속되고 있다 (GIRAFFE, 2008; Sterling et al., 2010; Yoo et al., 2017). 지진발생이 관망에 미치는 직접적인 영향중 하나가 매설관 훼손에 따른 누수 현상이다. 관망에서의 누수파악은 평상시 상수도시설운영시 유량손실 방지 및 수질에 대한 신뢰성 확보 등의 차원에서 중요하며, 지진발생이후 복구 및 사후관리를 위해서도 중요하다. 누수의 확인은 노면상의 유출 등을 직접적으로 확인하는 방법과 관 내부에 대한 화상진단을 통해 확인하는 방법, 하이드로폰을 이용한 수중청음방법 등과 함께 모델을 통한 예측 방법 등이 적용되고 있으며(Lee et al., 2018; MOE and KEITI, 2017), 지리정보시스템(Geographic information system)과 연계하여 관망의 지리적 배치와 누수관측 결과를 함께 활용하여 효율적인 누수관리를 수행하기 위한 기술개발도 계속되고 있다 (Lee et al., 2017). 국내에서도 지진발생이 물공급시스템에 미치는 수리학적, 구조적 영향의 신뢰성 분석을 위한 모형의 적용가능성에 대한 연구가 진행된 바 있으며, 이러한 다양한 연구를 기반으로 지진으로 인한 피해를 최소화하고 효율적인 복구를 수행하기 위한 지속적인 기술개발이 필요하다 (Yoo, 2013; Yoo et al., 2014; Yoo et al., 2017).

3. 외국의 관리 사례

3.1 범미보건기구와 세계보건기구

범미보건기구(PAHO: Pan American Health Organization)와 세계보건기구(WHO: World Health Organization)에서는 지진, 화산, 산사태, 허리케인, 태풍, 가뭄을 상수도

pp. 001-008

pp. 009-021

pp. 023-033

pp. 035-043

pp. 045-052

pp. 053-060

pp. 061-073

pp. 075-083

Table 1. Effects of disasters on water and wastewater treatment facilities

Disaster	General effects	Major effects of disasters on water and wastewater facilities
Earthquakes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fault lines along rocks and below the surface ▪ Sinking of the surface ▪ Avalanches, landslides, and mudslides ▪ Liquefaction 	<ul style="list-style-type: none"> • Total or partial destruction of intake, transmission, treatment, storage, distribution systems, and electric power supply system and communication systems • Rupture of transmission and distribution pipes and damage to joints between pipes or tanks, with consequent loss of water • Deterioration of the water quality at the source due to landslides and other phenomena
Volcanic eruptions	<ul style="list-style-type: none"> • Seismic events due to volcanic action • Landslides and mudflows • Flow of lava 	<ul style="list-style-type: none"> • Total destruction of the infrastructure in the areas directly affected by pyroclastic flows and surges • Obstruction with ash of surface water intakes, intake screens, transmission pipes, flocculators, clarifiers, and filters • Deterioration of the water quality at surface intakes and open reservoirs due to ash falls • Contamination of rivers, streams and springs in lahar deposition areas • Destruction of access roads to system components, communications and power lines • Collapse of or damage to structures due to ash accumulation.
Landslides	<ul style="list-style-type: none"> • Blockage or damage to roads along slopes • Changes in the normal flow of surface waters • Sinking or displacement of soils 	<ul style="list-style-type: none"> • Changes in the physical or chemical characteristics of intake water, which will affect treatment • Total or partial destruction of the intake and transmission components in the path of active landslides • Contamination of the water at surface intakes located in mountainous areas • Indirect impacts due to the blocking of roads and the disruption of power and communications • Blockage of sewage systems due to buildup of mud and stones
Hurricanes	<ul style="list-style-type: none"> • Damage to power lines or infrastructure 	<ul style="list-style-type: none"> • Partial or total damage to facilities, command posts and buildings, including broken windows, damaged roofs, and flooding • Rupture of mains and pipes in exposed areas, such as over rivers and streams • Rupture or disjuncting of pipes in mountainous areas due to landslides and water torrents • Rupture and damage to tanks and reservoirs • Damage to electrical transmission and distribution systems
Floods	<ul style="list-style-type: none"> • Damage or destruction of housing • Accumulation of water in low-lying areas 	<ul style="list-style-type: none"> • Total or partial destruction of river water intakes, pumping stations and power supply systems • Blockage of components due to excessive sedimentation • Loss of intake due to changes in the course of rivers and streams • Rupture of exposed pipes across and along rivers and streams • Contamination in water catchment areas
Drought	<ul style="list-style-type: none"> • Reduction of surface water • Changes in the fauna • Changes in the standard of living due to the negative impact of drought on the economy 	<ul style="list-style-type: none"> • Loss or reduction of surface- and groundwater sources and deterioration of water quality • A decline in water levels at intake points and in storage facilities • The need to distribute water with water trucks, affecting quality and increasing costs • Damage to the system due to lack of use • Accumulation of solid matter in sewage systems



Table 2. Earthquake response guidelines in USA

Agencies	Contents of the guidelines			References
	Before earthquake	During earthquake	After earthquake	
CDC	<ul style="list-style-type: none"> Providing scenarios for Practical drills List of emergency supplies(e.g. drugs, medications and dressings) Procedure of inspection for possible home hazards such as windows, heating units and fireplaces 	<ul style="list-style-type: none"> Guidelines for indoor behavior during earthquake Guidelines for outdoor behavior during earthquake Behavior in specific situations 	<ul style="list-style-type: none"> Drink safe water fact sheet Drinking water supply in emergency situation Safe Food supply 	US CDC, 2019
FEMA	<ul style="list-style-type: none"> Preparing emergency water <ul style="list-style-type: none"> Should store at least one gallon of water per person per day Purchase commercially bottled water 		<ul style="list-style-type: none"> Information about personal water managing procedures in emergency <ul style="list-style-type: none"> Boiling, chlorination, distillation 	US FEMA, 2014 Hyun et al., 2017
EPA	<ul style="list-style-type: none"> Incident action checklist <ul style="list-style-type: none"> Information about possible effect of earthquake on water and wastewater treatment utilities List of related agencies and reports 			US EPA, 2019
	<ul style="list-style-type: none"> Water supply procedures under normal or emergency conditions(Source → Treatment → Storage → Distribution) Key assumptions for emergency response scenarios(water use per capita, time-scale of outages, population affected, water quality targets) Alternative water distribution scenarios(e.g. normal water sources, neighbor utilities, local alternative sources, pre-packaged water) 			US EPA, 2011 Hyun et al., 2017

및 하수처리시설에 영향을 미치는 6가지 자연재난으로 분류하고 각각의 재난이 상하수도 시스템에 미치는 영향을 세분화하였으며(Table 1), 재난에 의한 피해의 최소화 및 대응을 위한 자원조달 방안 등을 포함한 비상시 운영 방안을 제시하였다 (PAHO and WHO, 2002).

3.2 미국의 지진 및 재난 관리

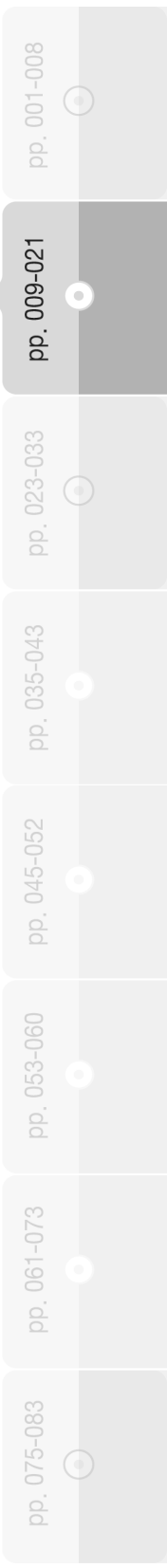
미국에서는 2012년 미국의 상수도시설의 상당수가 노후화되고 수명이 다해가고 있다는 미국수도협회(AWWA: American Water Works Association)의 발표 이후 위기상황에 대비한 수도시설 관리강화의 필요성이 더욱 강조되었다 (AWWA, 2012; US Congress, 2019). 이후 2018년 America's water infrastructure act(AWIA)가 시행됨에 따라 상수도과 하수도시설의 운영자가 관련시설의 위기대응능력에 대한 평가를 수행하고 위험상황 발생 시 대응체계 등을 정비하여 주기적으로 미국 환경청에 보고하도록 하여 상하수도시

설의 관리를 한층 더 강화하였으며 필요한 재정 지원을 위한 근거도 마련하였다 (US Congress, 2019).

미국의 경우 질병통제예방센터(CDC: Center for Disease Control and Prevention)와 연방재난관리청(FEMA: Federal Emergency Management Agency) 그리고 환경청(EPA: Environmental Protection Agency)에서 주로 지진과 관련된 대응을 위한 제도의 관리 및 기술개발을 수행하고 있다 (Table 2).

우선 질병통제예방센터와 연방재난관리청에서는 지진과 허리케인 등의 재난에 대비한 국민행동요령을 관리하고 있으며, 비상용 생수확보 등 음용수 관리와 관련된 세부 지침을 포함하고 있다 (Hyun et al., 2017; US FEMA, 2014).

미국환경청에서는 태풍, 지진, 가뭄, 허리케인, 쓰나미 등 자연재난의 유형별 물관련 시설의 관리를 위한 대응지침을 마련하여 관리하고 있다 (US EPA, 2019). 이 대응 지침은 재난유형별로 물관련 시설에 미치는 영향과 필요한 대응방향 및 절차를 제시하고 있으며 필요한 세부 대응 내용을 체크리스트 형식으로 포함



하여 위기상황 발생 시 체계적 관리 및 대응이 가능하도록 구성되어 있다. 또한 지진 등의 재난에 의한 수질오염발생 시 비상용수공급을 위한 단계별 지침과 정수처리, 용수저장 및 공급에 관련된 사항을 포함하고 있다 (Hyun et al., 2017; US EPA, 2011). 미환경청에서는 또한 기후변화에 따른 상수도, 하수도 및 홍수 관련 시설물의 운영에 대한 기후변화의 영향을 평가하고 관리하기 위한 프로그램인 climate resilience evaluation and awareness tool(CREAT)을 개발하여 운영 중에 있다 (US EPA, 2016). CREAT는 상수도와 하수도 각각에 대한 분석위주의 모듈과 함께 상수도의 영향을 함께 분석하는 모듈을 포함하여 실질적 활용성을 높일 수 있도록 구성되어 있다. CREAT에 기후관련 데이터를 입력하면 이를 기반으로 기후변화 등을 예측하고 이러한 변화가 공공시설물의 운영에 미치는 영향을 분석하며 사용자는 CREAT로부터 도출되는 결론을 시설물관리에 필요한 의사결정에 활용할 수 있다. 미환경청에서는 그 외에도 상수도 및 하수도 시설 운영자가 자연재난으로 인한 위기상황을 자체적으로 진단하고 대응 대책을 수립하는데 도움을 줄 수 있는 웹 프로그램인 VSAT web을 개발하여 제공하고 있다 (US EPA VSAT, 2019).

3.3 일본의 재난관리

일본에서는 반복적인 지진과 가뭄 등 다양한 자연재난이 발생해왔다. 후쿠오카 지역은 1978년과 1994년 극심한 가뭄을 겪었으며, 1995년 한신-아와지 대지진, 2011년 동일본 대지진 등 다수의 지진을 경험한 바 있다(The World Bank, 2018). 2011년 동일본 대지진은 모멘트 규모 9.0의 강력한 지진으로 50만명 이상의 시민들에게 수도공급이 중단되었으며, 2016년 쿠마모토 시에서는 두 차례의 지진으로 30만명 이상의 시민들에게 수도공급이 중단된 사례가 있다 (The World Bank, 2018).

일본은 1961년 재난 대응 기본법(Disaster countermeasures basic act)를 제정하면서 수도공급 등과 관련된 시설의 위험성 관리와 평가를 법제화 하였다 (The World Bank, 2018). 1974년 내진 덕타일주철관을 개발하였으나 주로 지진에 취약한 지역을 중심으로 제한적으로 사용되다가 1995년 한신-아와지 대지진 이후 널리 보급되어 사용 중에 있으며, 일본수도협회에서는 내진과 관련된 기술적인 검토를 수행하면서 2009년 내진

관련 세부 지침을 마련하여 제시한 바 있다 (JSWA, 2009).

2011년 동일본 대지진을 포함한 최근의 대규모 지진에서 지진에 따른 관로 파괴 등의 피해가 크게 발생하지 않았으며, 2016년 쿠마모토시 지진발생시 수도공급이 일시적으로 중단되었으나 지진발생 전 지진발생에 따른 위험도 진단을 수행하고 파이프라인(Pipeline), 펌핑(Pumping)시스템 등에 내진설계를 우선적으로 적용하였으며 지진발생 후에는 관계기관 간 긴밀한 협조로 신속한 복구를 추진하여 2주 만에 용수공급을 재개한바 있어, 그간의 내진관리 효과를 확인할 수 있었다 (The World Bank, 2018).

3.4 유럽의 재난관리

유럽의 각 국가들은 최근 기후변화의 영향으로 여러 형태의 자연재해로 사회경제적 피해를 입고 있다. 가장 최근인 2019년의 이탈리아 베네치아에서의 홍수, 그리스 및 발칸반도의 지진뿐만 아니라, 과거 중앙 및 남부 유럽지역의 가뭄(2003), 스페인 산불(2006), 프랑스 바르주의 홍수(2010) 등의 다양한 자연재해로 인적 및 경제적 피해가 발생하여 2017년 한해 동안 자연재해에로 약 200명이 사망했고 100억 유로에 이르는 경제적 피해가 발생하였다 (EEA, 2011; European Parliament, 2019)

이에 따른 대응으로 유럽의 의회의 의원회(MEPs)에서는 이러한 예기치 못한 환경재난과 비상사태에 대하여 신속하고 효과적으로 대응하기 위하여 유럽공동체 EU civil protection mechanism을 마련하였다. 영국의 경우, 초대형 재해 및 위기상황에서 자국민을 보호하기 위하여 2004년 국가비상관리법(The Civil Contingencies Act, CCA)을 제정하여 대응하고 있다. 즉 재난 및 위기상황이 발생하면 지방자치단체는 경찰, 소방/구조, 의료, 해양 및 환경과 관련된 지방정부 내 하위 조직과 전기, 가스, 수도, 통신, 대중교통과 같은 공공시설 임무를 맡은 도로공사, 보건안전 관리국이 발생 재난을 바로 통제할 수 있도록 하여 긴급시 중앙정부가 직접관여하지 않고 지방정부 중심으로 효율적으로 피해를 복구하는 시스템을 갖추고 있다. 또한 국민의 안전을 위해서 피해복구 인프라 대상을 에너지, 정수 및 하폐수, 통신, 교통, 교육기관의 순으로 지원하도록 규정하여 원활한 에너지 공급 및 물 공급과 처리를 가장 긴급하고 중요한 복구 대상으로서 우선순위를 두



고 있다 (Åhman et al., 2009; Bremberg, 2010; HM Governmnet, 2013).

최근에는 인공 지능 (AI), 사물 인터넷 (IoT) 및 빅 데이터와 같은 기술의 개발과 로봇 공학 및 드론 기술과 같은 기술영역의 혁신으로 유럽에서도 재난 위험 감소 및 관리를 포함한 많은 분야가 변화되고 있다. 무선 광대역 네트워크, 스마트 폰 및 클라우드 컴퓨팅과 같은 디지털 인프라 및 장치를 재난피해 복구에 지원함으로써 재해 관리를 위한 혁신적인 기술을 적용 할 수 있는 기반을 마련하고 있다 (ITU, 2019).

4. ICT 기반 재난관리 기술

최근에는 재난발생시 시스템이 최대한 정상상의 운영 상태를 유지할 수 있도록 하고 불가피하게 피해가 발생했을 시 이를 최대한 빠르게 회복하기 위한 현황분석 및 시스템 구축과 관련된 많은 연구가 계속되고 있다 (Cimellaro et al., 2015; Hosseini et al., 2016; Sharifi and Yamagata, 2016; Shin et al., 2018). 하지만 재난이 상하수도시설에 미치는 영향은 시설의 성격과 지역 국가 등에 따라 다양하게 나타날 수 있으며, 영향을 미치는 요인, 피해발생 및 이후의 복구과정 등은 많은 불확실성을 포함하고 있어 이를 정량화하고 설계와 운영에 직접적으로 반영하는 것은 아직까지 제한적이다 (Reca et al., 2008; Shin et al., 2018).

최근 빠르게 발전하고 있는 ICT는 다양한 분야에 활용되고 있다. ICT를 이용한 현장 모니터링 기술은 교량 등 구조물관리와 재난관리 등에 지속적으로 이용되어 왔으며(Na et al., 2008; Yoon et al., 2019) 수질 모니터링부터 수량관리까지 물환경 분야에도 빠르게 적용되고 있다 (Čolaković and Hadžialić, 2018; Han and Kim, 2016; Wong and Kerkez, 2016). 또한 지진의 전조 현상에 대한 실시간 감시와 관련 데이터 분석을 통한 지진 조기경보 시스템구축 및 사후 복구에 무선네트워크, 드론 등 다양한 ICT를 활용하는 연구도 계속되고 있다 (Hussain et al., 2018; Nemoto and Hamaguchi, 2014; Salam et al., 2018; Shinohara et al., 2018; Ur Rahman et al., 2016). Chou et al. (2014) 은 다양한 환경사고의 과학적 대응을 위해 ICT 기반의 국제적 협력과 대응 체계 구축의 필요성을 제시하였다.

실시간 모니터링과 드론을 이용한 면단위 분석 등 다양한 ICT기반의 기술을 이용한다면 상하수도시설의

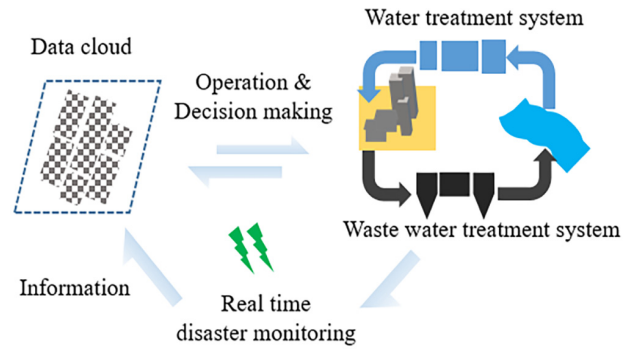


Fig. 2. Schematic of disaster management system based on ICT.

실시간 통합관리가 가능하며 이를 통해 상하수도시스템의 재난대응 체계의 수준을 한층 더 높일 수 있을 것이다. 예를 들어 지진의 예측을 위해서는 지진의 발생 가능성이 높은 활성단층에 대한 현황조사 등이 필요한데, 항공기 및 무인항공장치(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)를 이용한 항공사진, 인공위성의 위성영상 등의 분석을 통해 관심 지역의 활성단층분포와 지질학적 특성을 파악하고 공간 빅데이터 분석 등을 통해 지진발생의 위험을 사전에 예측하는 기술의 개발로 지진피해를 최소화하는데 기여할 수 있을 것이다 (Fig. 2) (Hyun et al., 2017; Jung, 2017).

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 최근 관심이 높아지고 있는 지진발생에 대응하여 국민의 생활과 직결되는 주요 기간시설 중 하나인 상하수도시설의 안정적 운영을 수행하기 위한 관리체계 및 기술개발 현황을 분석하였다. 우리나라에서는 지진발생에 대비한 국가차원의 법령, 지침 및 기준을 지속적으로 관리해왔다. 현재의 기준들은 대부분 지진 뿐 아니라 태풍, 홍수, 가뭄 등 여러 가지 자연재난을 함께 고려하여 관리 되고 있으며, 이러한 방식은 관리의 측면에서 효율성을 확보할 수 있는 장점이 있으나, 각 재난의 특성을 고려한 세부적인 대응 시스템의 구축 및 기술개발에는 제한 요인이 될 수 있어 중장기적인 차원에서 관리 제도와 시스템을 좀 더 세분화하는 방안을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

아직까지 우리나라에서는 지진발생에 대비한 상하수도시설의 운영과 관련된 기술적인 연구는 상대적으로 많지 않다. 지진발생에 의해 상하수도 시설에 실제

pp. 001-008

pp. 009-021

pp. 023-033

pp. 035-043

pp. 045-052

pp. 053-060

pp. 061-073

pp. 075-083

피해가 발생한 사례가 많지 않은 것은 다행스러운 일이나, 최근 지진의 발생빈도가 높아지는 현실을 고려할 때 우리나라 실정에 맞는 기술개발의 필요성이 높아지고 있는 것도 사실이다. 향후 우리나라의 자연적, 인위적 특성을 고려한 보다 체계적이고 과학적인 상하수도시설 지진대응 시스템을 마련하기 위해서는 최근 빠르게 발전하는 ICT를 적극적으로 활용하고 파일럿(Pilot) 실험 등을 이용한 실증연구를 통해 최적시스템의 구축에 필요한 기술을 확보하기 위한 노력이 계속되어야 할 것이다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경시설 재난재해 대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2019002870001).

References

- Åhman, T., Nilsson, C., and Olsson, S. (2009). The community mechanism for civil protection and the European Union solidarity fund. In *Crisis Management in the European Union*. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany. 83-107.
- Asefa, T., Clayton, J., Adams, A., and Anderson, D. (2014). Performance evaluation of a water resources system under varying climatic conditions: Reliability, Resilience, Vulnerability and beyond, *J. Hydrol.*, 508, 53-65.
- AWWA. (2012). *Buried No Longer: Confronting America's Water Infrastructure Challenge*, Water Utility Council, American Water Works Association, Denver. USA.
- Bevington, J.S., Hill, A.A., Davidson, R.A., Chang, S.E., Vicini, A., Adams, B.J., and Eguchi, R.T. (2011). "Measuring, monitoring, and evaluating post-disaster recovery: A key element in understanding community resilience", *Proceedings of ASCE Structures Congress, Reston, VA, USA*. American Society of Civil Engineers.
- Bremberg, N. (2010). Security, governance and community beyond the European Union: exploring issue-level dynamics in Euro-Mediterranean civil protection, *Mediterr. Polit.*, 15(2), 169-188.
- Chisolm, E.I. (2007). Impact of hurricanes and flooding on buried urban infrastructure networks, Doctoral Dissertation, Louisiana Tech University, Louisiana, USA.
- Cho, S.B., and Kim, N.Y. (2018). A review on seismic design criteria for dam, *Korean Soc. Civ. Eng. Mag.*, 66(3), 48-52.
- Chou, J.M., No, T.H., Sim, C.S., Gang, T.G., Kim, C.K., Jung, S.U., and Park, S.G. (2014). A research on regional cooperation strategy for environmental disaster response in Northeast Asia, *Korea Environmental Institute report* 2014-07.
- Cicerone, R.D., Ebel, J.E., and Britton, J. (2009). A systematic compilation of earthquake precursors, *Tectonophysics*, 476(3-4), 371-396.
- Cimellaro, G.P., Tinebra, A., Renschler, C., and Fragiadakis, M. (2015). New resilience index for urban water distribution networks, *J. Struct. Eng.*, 142(8), C4015014.
- Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M., and Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience, *Eng. Struct.*, 32(11), 3639-3649.
- Čolaković, A., and Hadžialić M. (2018). Internet of things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues, *Comput. Netw.*, 144, 17-39.
- Davis, C.A., O'Rourke, T.D., Adams, M.L., and Rho, M.A. (2012). "Case study: Los Angeles water services restoration following the 1994 Northridge earthquake", *Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 24-28 September 2012, Lisbon, Portugal.
- Davis, C.A. (2014). Water system service categories, post-earthquake interaction, and restoration strategies, *Earthq. Spectra*, 30(4), 1487-1509.
- EEA. (2011). Mapping the impacts of the natural hazards and technical accidents in Europe, *European Environment Agency Technical report*, No 13/2010, 2011.
- European Parliament. (2019). <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190213STO26335/disaster-management-boosting-the-eu-s-emergency-response> (November 30, 2019).
- Geller, R.J. (1997). Earthquake prediction: a critical review, *Geophys. J. Int.*, 131(3), 425-450.
- GIRAFFE. (2008). *GIRAFFE User's Manual. School of Civil and Environmental Engineering*, Cornell University, Ithaca, NY.
- Han, H.J., and Kim, J.S. (2016). Toward an IoT-based water and environment management system: opportunities, challenges, and policy options, *Korea Environmental Institute Policy Report*, 2016-04.
- Hao, T., Rogers, C.D.F., Metje, N., Chapman, D.N., Muggleton, J.M., Foo, K.Y., Wang, P., Pennock, S.R., Atkins, P., Swinger, S.G., and Parker, J. (2012). Condition assessment of the buried utility service infrastructure, *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 28, 331-344.
- HM Government (2013). Guidance-emergency response and



- recovery(ver.5), Cabinet office, London, UK.
- Ho, J.Y.E., Chan, E.Y.Y., Lam, H.C.Y., Yeung, M.P.S., Wong, C.K.P., and Yung, T.K.C. (2019). Is “perceived water insecurity” associated with disaster risk perception, preparedness attitudes, and coping ability in rural China?, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16(7), 1254.
- Hoque, Y.M., Tripathi, S., Hantush, M.M., and Govindaraju, R.S. (2012). Watershed reliability, resilience and vulnerability analysis under uncertainty using water quality data, *J. Environ. Manag.*, 109, 101-112.
- Horton Jr, J.W., and Williams R.A. (2012). The 2011 Virginia earthquake: What are scientists learning?, *Eos, T. Am. Geophys. Union*, 93(33), 317-318.
- Hosseini, S., Barker, K., and Ramirez-Marquez, J.E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience, *Reliab. Eng. Syst. Safe*, 145, 47-61.
- Hussain, Z., Shah, R.H., and Memon, N.A. (2018). Sensor based survival detection system in earthquake disaster zones, *Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur.*, 18(5), 46.
- Hyun Y.J., Park, J.G., Lee, Y.J., Lee, J.H., Lee, M.J., Park, J.G., Lee, B.S., Lee, S.T., Lee, S.T., Lee, T.K., Lee, H.D., Jun, I.S., and Choi, H.S. (2017). Environmental Effects and Countermeasures of Earthquakes, 2017-01, Policy Report, Korea Environmental.
- ITU(International Telecommunication Union). (2019). <https://www.itu.int/en/ITU-D/Emergency-Telecommunications/Pages/Events/2019/GET-2019/Disruptive-technologies-and-their-use-in-disaster-risk-reduction-and-management.aspx>. Disruptive technologies and their use in disaster risk reduction and management (November 30, 2019).
- JSWA. (2009). *Guidelines for Designing the Sanitation system*, Japan Sewage Works Association, Tokyo, Japan.
- Jung, H.S. (2017). “Observation of seismic activity through satellite observation”, *The 3rd Earthquake and Environmental Safety Policy Forum*, The Geological Society of Korea, Seoul, Republic of Korea.
- Kim, H.I., Ahn, J.C., Song, J.S., Ahn, G.M., Park, T.J., Hwang, J.H., Lim, H.T., and Choi, Y.J. (2015). *Research on lightning damage reduction technology for the water supply environment*, Seoul Waterworks Authority.
- Kim, I.H. (2017) Seismic design and performance objectives of civil facilities, *Korean Soc. Civ. Eng. Mag.*, 65(4), 20-25.
- Kim, I.H., and Cho, K.S. (2019). Current status and improvement of national seismic design standards, *Korean Soc. Civ. Eng. Mag.*, 67(6), 16-25.
- KISC. (2015). *A research on the establishment of comprehensive seismic performance evaluation procedure and software development for water supply system*, RD-15-R3-037, Korea Infrastructure Safety Corporation.
- KISTC. (2004). *Seismic performance evaluation and improvement of the existing water supply system*, GOVP1200519147, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation.
- KMA. (2019). https://www.weather.go.kr/weather/earthquake_volcano/domesticlist.jsp, Korea Meteorological Administration Earthquake list (October 17, 2019).
- KMLIT. (2018). *Seismic design general, Korean design standard*, KDS 17 10 00:2018, Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- KMPSS. (2015). *A basic plan for reinforcement of infrastructures seismic design 2nd stage(2016-2020)*, Korean Ministry of Public Safety and Security, 80-81.
- Koizumi, N. (2013). Earthquake prediction research based on observation of groundwater, *Synthesiology English edition*, 6(1), 27-37.
- KWWA. (2010). Water supply facility standard.
- KWWA. (2011). Sewerage facility standard.
- KWWA. (2017). A Research on the Improvement of Seismic Design Criteria for Major Facilities of Water Supply and Sewerage System.
- Lee, A.V., Vargo, J. and Seville, E. (2013). Developing a tool to measure and compare organizations’ resilience, *Nat. Hazard Rev.*, 14(1), 29-41.
- Lee, C.W., Jun, J.S., Joo, J.G., and Yoo, D.G. (2018). Uncertainty analysis for leakage of water supply networks using pressure dependent leakage analysis, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 18, 129-136.
- Lee, H.A., Hamm, S.Y., and Woo, N.C. (2017). Groundwater monitoring network for earthquake surveillance and prediction, *Econ. Environ. Geol.*, 50, 401-414.
- Lee, H.D. (2016a). “Damage status and countermeasures of water supply systems by earthquake”, *The 1st Earthquake and Environmental Safety Policy Forum*, Seoul, Korea, The Geological Society of Korea.
- Lee, J. (2016b). Gyeongju earthquakes recorded in daily groundwater data at national groundwater monitoring stations in Gyeongju, *J. Soil Groundw. Environ.*, 21, 80-86.
- Matthews, J.C. (2015). Disaster resilience of critical water infrastructure systems, *J. Struct. Eng.*, 142(8), C6015001.
- MOE. (1999). A research on the development of seismic design criteria for water supply system.
- MOE. (2009). A research on the development of seismic design criteria for sewerage system.

- MOE. (2019). Seismic design for dam.
- MOE and KEITI. (2017). Explore the location with extremely low frequency for leak of waterworks facilities.
- MOE and MOLIT (2016). Manual for crisis response in drinking water supply system.
- Na, H.J., Jung, C.H., Lee, D.H., Lee, W.G, Ryu, D.H. and Nam, S.H. (2008). Development of disaster prevention system based on Ubiquitous Sensor Network, *J. Korea Multimed. Soc.*, 12(1), 1-17.
- Nemoto, Y., and Hamaguchi, K. (2014). Resilient ICT research based on lessons learned from the great east Japan earthquake, *IEEE Commun. Mag.*, 52(3), 38-43.
- PAHO and WHO. (2002). Emergencies and disasters in drinking water supply and sewerage systems: guidelines for effective response.
- Park, J.G., Suh, Y.W., and Gan, S.Y. (2018). Chemical handling facility safety management plan for natural disaster triggered technological disaster (Natech), Korea Environmental Institute Research Report.
- Park, K.S., Seo, H.Y., Kim, I.H., and Kim, D.S. (2013). "A study on improvement of Korea infrastructures seismic design criteria", *Proceedings of Earthquake Engineering Society of Korea spring conference*, 53-58. Korea, Earthquake Engineering Society of Korea.
- Reca, J., Martinez, J., Banos, R., and Gil, C. (2008). Optimal design of gravity-fed looped water distribution networks considering the resilience index, *J. Water Res. Pl.*, 134(3), 234-238.
- Rikitake, T. (1979). Classification of earthquake precursors, *Tectonophysics*, 54(3-4), 293-309.
- Salam, H.U., Memon, S., Das, L., and Z. Hussain, Z. (2018). *Drone Based Resilient Network Architecture for Survivals in Earthquake Zones in Pakistan*, Sindh Univ. Res. J.,(Sci. Ser.) 50(01), 175-182.
- Sharifi, A., and Yamagata Y. (2016). On the suitability of assessment tools for guiding communities towards disaster resilience, *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 18, 115-124.
- Shin, S., Lee, S., Judi, D.R., Parvania, M., Goharian, E., McPherson, T., and Burian S.J. (2018). A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems, *Water*, 10(2), 164.
- Shinohara, M., Yamada, T., Sakai, S., Shiobara, H., Kanazawa, T., and Uehira, K. (2018). "Installation and operation of ICT seafloor cabled seismic and tsunami observation system in source region of Tohoku-oki earthquake", *Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting*, San Francisco, USA, American Geophysical Union.
- Sterling, R., Simicevic, J., Allouche, E., Condit, W., and Wang, L. (2010). *State of technology for rehabilitation of wastewater collection systems*, EPA/600/R-10/078, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- Sweetapple, C., Astaraie-Imani, M., and Butler, D. (2018). Design and operation of urban wastewater systems considering reliability, risk and resilience, *Water Res.*, 147, 1-12.
- The World Bank. (2018). Resilient water supply and sanitation services-The case of Japan, The World Bank Group, Washington DC. USA.
- Ur Rahman, M., Rahman, S., Mansoor, S., Deep, V., and Aashkaar, M. (2016). Implementation of ICT and wireless sensor networks for earthquake alert and disaster management in earthquake prone areas, *Procedia Comput. Sci.*, 85, 92-99.
- US CDC. (2019). <https://www.cdc.gov/disasters/earthquakes/>. United States Centers for Disease Control and Prevention (November 30, 2019).
- US Congress. (2019). America's water infrastructure act of 2018 (P.L. 115-270): Drinking water provisions, US congress, 1-3.
- US EPA. (2011). Planning for an emergency drinking water supply.
- US EPA. (2016). Climate resilience evaluation and awareness tool version 3.0 methodology guide.
- US EPA. (2019). <http://www.epa.gov/waterutilityresponse/incident-action-checklists-water-utilities>. United States Environmental Protection Agency Incident Action Checklist for Water Utilities (October 15, 2019).
- US EPA VSAT. (2019). <https://vsat.epa.gov/vsat/>. United States Environmental Protection Agency Vulnerability Self Assessment Tool (October 22, 2019).
- US FEMA. (2014). Basic preparedness.
- Wang, K., Chen, Q.F., Sun, S., and Wang, A. (2006). Predicting the 1975 Haicheng earthquake, *B. Seismol. Soc. Am.*, 96(3), 757-795.
- Wong, B.P., and Kerkez, B. (2016). Real-time environmental sensor data: An application to water quality using web services, *Environ. Modell. Softw.*, 84, 505-517.
- Yoo, D.G. (2013). Seismic reliability assessment for water supply networks, Doctoral Dissertation, Korea University, Seoul, Republic of Korea.
- Yoo, D.G, Kang, D.S., and Kim, J.H. (2014). Developing Seismic Risk Assessment Model for Water Supply Networks, *Proceeding of Korean Society of Hazard Mitigation conference*, 2014, 240. Incheon, Korea, Korean Society



of Hazard Mitigation.

Yoo, D.G, Kang, D.S., Park, M.J. and Joo, J.G. (2017). Sensitivity analysis of model parameters in seismic reliability assessment model of water supply systems, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 17, 95-105.

Yoon, W.G., Song, Y.J., Moon, J.S., Jang, S.J., and Yoo, S.J. (2019). Deep learning based temperature sensor data and wildfire propagation prediction in duty cycled wireless sensor network, J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci., 44(6), 1092-1104.

pp. 001-008	
pp. 009-021	
pp. 023-033	
pp. 035-043	
pp. 045-052	
pp. 053-060	
pp. 061-073	
pp. 075-083	