

# 상수관망 지진재해 대응력 향상을 위한 프로그램 개발



**강 두 선** |  
경희대학교 사회기반시스템공학과 교수  
doosunkang@gmail.com



**유 도 건** |  
고려대학교 공학기술연구소 박사 후 연구원  
godqhr425@naver.com



**김 중 훈** |  
고려대학교 건축사회환경공학부 교수  
jaykim@korea.ac.kr

## 1. 서론

우리나라는 환태평양 지진대 중에서도 지진과 연관된 화산활동이 매우 활발한 일본열도에 근접에 있지만 일본, 대만, 중국 등에 비해 지진피해가 상대적으로 드물다. 그러나, 1995년 일본 고베지역에서 발생한 ‘한신 아와지 대지진’, 2000년 타이완에서 발생한 ‘치치 대지진’, 그리고 2011년 3월에 발생한 ‘후쿠시마 강진’은 한반도가 더 이상 지진 안전지대가 아닐 수 있음을 보여주었다. 그림 1은 기상청에서 발표한 1978년부터 2010년까지의 연도별 국내 지진 발생 횟수를 나타낸 그래프로 지진의 발생횟수가 점차 증가추세에 있음을 알 수 있다.

지진에 의한 피해는 상하수도, 전력, 도로 및 교량 시스템 등과 같은 라이프라인 시스템(Lifeline system)에 크게 나타나며, 라이프라인의 파괴는 사회 전반적으로 장기적인 기능 마비를 야기할 수 있어 그 대응책이 시급하다. 국내의 경우 전력망, 교통망, 교량

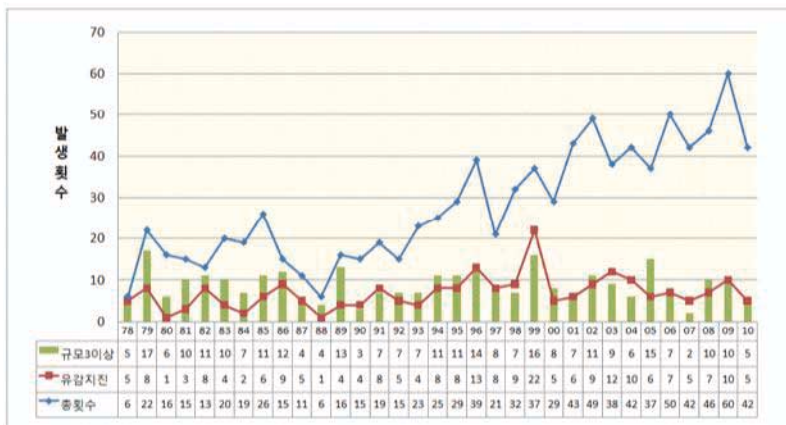


그림 1. 1978년~2010년 국내 지진 발생 횟수 (기상청)

등에 대한 내진 기준은 점차 강화, 보완되고 있으나, 타 기반시설물에 비해 용수공급 시스템에 대한 내진 기준은 취약한 실정이다. 환경부 상수도통계(2011)의 시·도별 취수시설 현황을 살펴보면 전국의 702개 취수시설 설계용량의 70%에 해당하는 7개 특·광역시 취수시설이 단지 37개로 운영되고 있음을 알 수 있다. 이것은 소수의 대형 취수시설에서 취수되는 원수에 의하여 대부분의 시민들이 용수를 공급받고 있다는 것을 의미한다. 만일 지진과 같은 대규모 재해가 발생하여 주요 용수공급 라인이 파괴될 경우, 그 피해규모가 막대할 수 있음을 시사한다. 용수공급 시설이 지진피해를 입을 경우 구조적인 1차 피해와 더불어 수량감소, 화학적 오염 등의 2차 피해가 나타날 수 있으며, 따라서 피해범위가 대규모 그리고 장기화 될 가능성이 있다. 1995년에 발생한 고베지진으로 인해 장기간 용수공급이 중단되면서 약 1500만명의 이주민이 발생하였고 복구까지 수개월이 걸린 사례는 이러한 지진피해의 심각성을 잘 나타내고 있다(그림 2 참조).

우리나라는 최근 가뭄으로 인한 도서, 산간 지역의 일시적인 용수공급 중단사태를 겪으면서 용수공급 시스템의 중요성이 새삼 부각되었다. 하지만, 시스템 파괴로 인한 피해는 규모와 기간 면에서 훨씬 심각하다고 할 수 있다. 국내의 경우 지진재해에 대비한 시스템의(사전) 설계, 그리고 재해 발생 시 신속한(사후) 복구 프로그램이 명확히 제시되어 있지 않은 상황이라, 지진 발생 시 막대한 사회, 경제적인 손실이 발생할 가능성을 배제할 수 없다. 지금껏 지진 등의 재해를 고려하여 용수공급 시스템의 신뢰도를 산정하고 이에 대한 대응 방안을 제시하는 모형의 개발은 전혀 이루어진 바가 없다. 국내의 경우 일부 관망 시스템과 관련한 재해연구의 경우 대부분 매설관로의 물리적 지진 취약도를 구조해석을 통하여 산정하는데 그치고 있다(이형진 등 2006; 이도형 등 2010). 해외의 경우를 살펴보면, 가장 널리 알려진 모형은 미국 재난관리청(FEMA)에서 개발한 HAZUS프로그램으로 재해에 따른 산술적 피해 정도를 평가한다(FEMA 1997). 하지만,



그림 2. 고베 지진으로 인한 관로 파괴

HAZUS의 경우 관망시스템과 같은 수리해석이 필요한 시스템의 수리학적 상태를 반영하지는 않는 것으로 알려져 있다.

저자는 본 학회지 “물과 미래” 2월호에 “상수관망 지진재해 신뢰성 평가 모형 - REVAS.NET”이라는 제목으로 학술/기술기사를 투고한 바 있다(유도근 등 2013). 지난 기사에서는 지진재해에 대비한 상수관망 신뢰성 평가모형인 REVAS.NET (Reliability EVALUATION model of Seismic hazard for water supply NETworks)의 이론적 배경과 구동절차에 대해 설명하고, 간단한 적용 예를 소개하였다. 본고에서는 지난 기사에서 소개한 “상수관망 지진재해 신뢰성 평가 모형”을 보다 확대하여 컴퓨터를 기반으로 한 “지진대응 용수공급 시스템의 (사전) 설계, 보강 및 (사후) 신속 대응, 복원을 위한 통합모형”의 개발 방안에 대하여 소개하고자 한다. 개발될 모형은 다양한 지진 시나리오의 시뮬레이션이 가능하도록 하여, 재해가 발생하지 않은 상황에서는 재해에 대비한 시스템의 보강, 내진 설계를 위한 신뢰성 평가 및 최적화 프로그램의 용도로 활용

가능하고, 실제 재해 발생 시에는 시스템의 신속한 복구를 돕기 위한 의사결정 시스템의 역할을 수행하도록 한다.

## 2. 상수관망 지진대응 통합모형

일반적으로 지진피해 경감에 관한 연구는 일차적으로 지진에 의한 시설물 붕괴를 미연에 최소화 하는 방안과 이차적으로 재해 발생 후에 시스템의 상실된 기능을 신속하게 복원하기 위한 방안으로 구분된다. 전자는 사전보강 차원에서의 내구성 강화이고, 후자는 사후복구 측면에서의 복원력 강화라고 할 수 있다. 그림 3은 지진발생 전, 후로 시스템 기능의 변화를 그래프(System performance curve)로 나타내고 있다. 지진이 발생하는 시점( $T_0$ ) 이전까지 시스템은 100% 제 기능을 발휘하고 있다고 가정하자. 지진발생 직후, 시스템의 기능은 B지점까지 감소하게 되고, 이후 복구작업에 의해 점차 시스템이 제 기능을 되찾아 감에 따라 시간  $T_1$ 에서 다시 재해발생 이

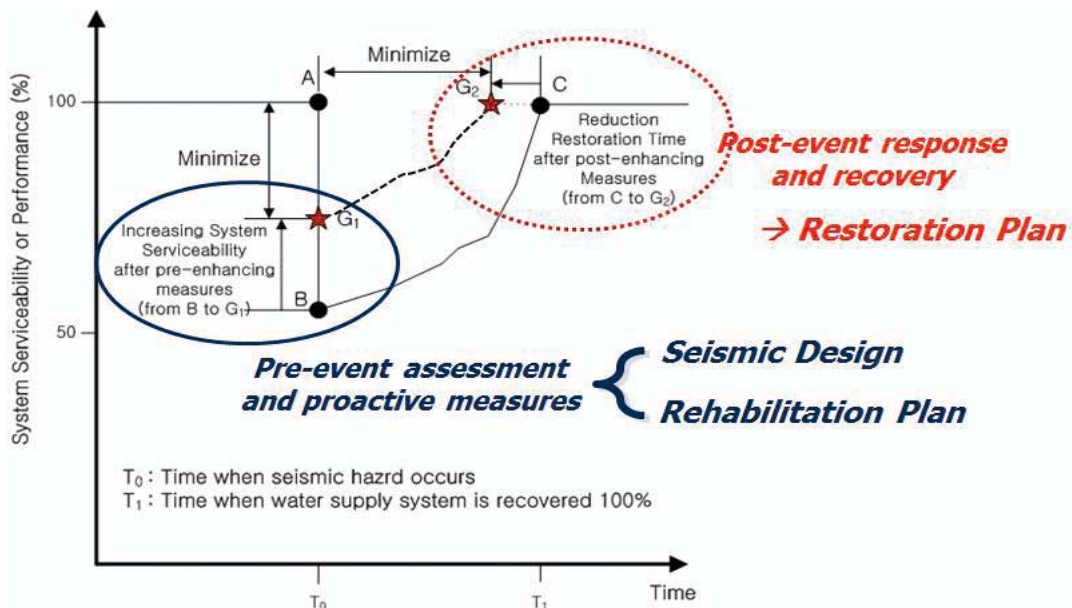


그림 3. 지진발생에 의한 시스템 성능곡선의 변화

전의 상태로 복구된다고 가정할 수 있다. 지진재해에 의한 이러한 일련의 시스템 기능의 변화추이(A→B→C)를 기본조건이라고 하자. 앞서 언급한 대로 지진재해에 의한 피해를 최소화하기 위한 첫 번째 방안으로 사전보강 차원에서의 내구성 강화를 실시할 경우, 지진발생 직후의 시스템 상태는 보강 전 B지점에서 보강 후 G<sub>1</sub>지점으로 기능을 향상시킬 수 있을 것이다(즉, 초기 피해 정도를 줄일 수 있을 것이다). 또한 두 번째 방안으로 신속하고 적절한 사후 복구에 의한 복원력 강화에 의해 시스템의 정상 기능 도달시간이 보강 전 C지점에서 보강 후 G<sub>2</sub>지점으로 단축될 수 있을 것이다. 요약하면, 지진대응 모형 수립 및 적용이후, 시스템의 성능곡선이 대응 전 [A→B→C]에서 대응 후 [A→G<sub>1</sub>→G<sub>2</sub>]로 이동함으로써 지진재해에 의한 피해규모 및 피해시간을 줄일 수 있을 것이다.

본고에서 소개하고자 하는 통합모형은 컴퓨터 기반의 가상 시뮬레이션 프로그램으로서, 재해 발생에 따른 시스템의 상태를 Risk-free, Virtual 환경에서 구현하도록 한다. 따라서, 다양한 지진 시나리오의 시뮬레이션이 가능하며 재해가 발생하지 않은 상황에서는 재해에 대비한 시스템의 보강, 내진 설계의 용도로 활용 가능하고, 재해 발생 시에는 시스템의 신속한 복구를 돕기 위한 의사결정 시스템의 역할(복구 예상시간 예측, 복구 소요장비, 인력, 물품량 예측, 복구 우선순위 결정, 복구인력 및 장비 배치 결정 등)을 수행하도록 한다. 모형의 개발과정에서 과거 한반도에 발생한 지진 자료뿐만 아니라, 일본, 대만, 미국 등 해외에서 발생한 과거 지진 피해 및 복구 사례, 관련 데이터를 종합적으로 검토하여 다양한 시나리오에 효율적으로 적용할 수 있는 모형으로 개발한다. 우리나라의 경우 특별시, 광역시 등을 중심으로 용수공급 시스템의 정보가 GIS(Geographic Information System)로 구축되어 있기 때문에 개발하고자 하는 모형

과 GIS데이터를 연계함으로써 상수도 운영 실무자가 직관적으로 사용할 수 있고, 교육 및 훈련 도구로도 활용 가능할 것이다. 본 모형은 다양하고 광범위한 실제 피해 및 복구 사례를 조사, 수집함으로써 최대한 실제상황과 가장 근접한 실무형 모형으로 개발하도록 한다. 개발하고자 하는 모형은 크게 두 가지 모듈로 구성이 되며, 다음 절에 각각의 모듈에 대하여 상세히 기술하였다.

## 2.1 시스템 보강 및 내진 설계 모듈

개발 모형의 첫 번째 활용 모듈은 지진대비 사전 시스템 보강 및 내진설계를 위한 설계(Design) 모듈이다. 시스템의 보강은 지진에 가장 취약한 구성요소 혹은 파손 시 시스템의 용수공급에 가장 큰 영향을 미치는 요소들을 대상으로 이루어지게 되며, 이러한 대상요소들을 선정하기 위해서는 발생 가능한 다양한 지진을 모의하여야 한다. 지진 모의 발생에 의한 관로, 배수지, 양수시설 등 시스템 구성요소의 상태가 결정이 되면, 이를 수리해석모형에 입력하여 유량, 압력 등 수리해석 결과를 계산하게 된다. 지진발생 상황에서 시스템의 용수공급능력을 정량화하기 위하여 신뢰성 인자를 사용하게 되는데, 본 연구에서는 시스템 요구 수요량(Required demand)에 대한 실제 공급가능량(Available demand)의 비로 나타내는 사용성(Serviceability)을 신뢰성 지수로 사용한다. 따라서, 시스템의 보강 혹은 내진설계의 목적함수는 바로 시스템의 사용성(Serviceability)을 최대화하는 것이다. 그림 4는 용수공급 시스템의 지진재해 발생 모의 및 신뢰도의 공간적 분포도를 나타낸 예시이며, 개발 모듈의 구성요소 및 개발 방안에 대한 설명은 다음과 같다.

- 1) 사전 시스템 보강 우선순위 산정기법 개발
  - 지진피해에 대비한 사전 시스템 보강 및 내진설계 방안 연구

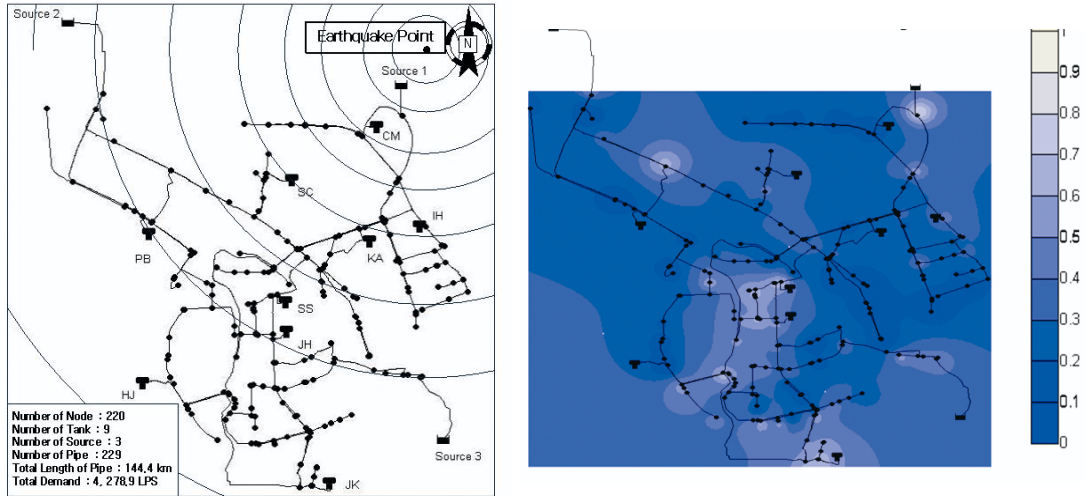


그림 4. 상수관망 지진재해 발생 모의 및 신뢰도의 공간적 분포도 예시

- 내구성 향상을 위한 내진보강 우선순위 결정(최소비용, 최대효과 기준)

2) 용수공급 시스템의 수리학적 신뢰도 향상 기법 개발

- 내구성 향상(관경증대, 관종변경, Dual 파이프 설치 등)을 통한 용수공급 신뢰도 향상 방안 연구
- 시스템의 구조적 개선(제수밸브 추가 설치, 대체경로 설치, 탱크 추가 설치 등)을 통한 용수공급 신뢰도 향상 기법 연구

3) 신뢰도를 극대화하기 위한 시스템 보강 및 설계 방안 최적화기법 개발

- 모형 내 최적화 알고리즘(Genetic Algorithm) 추가 연동
- 다목적 최적화 기법을 활용한 비용최소화-신뢰도최대화를 위한 보강 및 설계 모듈 개발(보강대상관로, 관경, 대체경로 결정 등)

2.2 시스템 복구 전략 모듈

사전 시스템 보강 및 내진설계는 최대한 지진

발생 초기의 손실을 감소시킬 수 있지만, 지진재해의 특성상 시스템의 기능 저하를 피할 수는 없다. 따라서, 지진이 발생하였을 경우, 시스템의 기능을 재해발생 이전의 상태로 복원하는 노력이 이루어져야 한다. 본 개발 모형의 두 번째 활용 모듈은 지진 발생 후 시스템의 신속한 복구를 돕기 위한 의사결정시스템(Decision Support System) 모듈이다. 지진발생 직후 시스템의 상태를 파악한 후, 수리해석을 통해 현재상태의 용수공급상황을 시뮬레이션 한다. 가용한 인력 및 장비를 파악한 후, 시스템의 복구가 최대한 신속하게 이루어질 수 있도록, 복구 전략을 수립한다. 예를 들어, 정수장과 가까운 시설물을 우선적으로 복구하거나, 용수공급량이 큰 관(일반적으로 직경이 큰 관)을 우선적으로 수리하거나, 용수공급이 시급한 시설(병원 등 의료시설)로 연결된 노선을 우선적으로 수리하는 등의 복구 우선순위를 결정하여, 복구 인력 및 장비를 배치하도록 한다. 이를 통해 복구 예상시간, 복구 소요 장비, 인력, 물품량을 예측할 수 있고, 시간에 따른 시스템의 전반적인 신뢰도의 변화추이를 예측할 수 있다. 필요한 경우, 우선순위를 변경하여 그에 따른 시스템 복구상황을 비교함으로써 보다

신속한 복구전략을 수립할 수 있도록 한다. 그림 5는 지진발생 후 시간에 따른 시스템의 신뢰도(용수공급 가능성)의 변화양상을 나타낸 그림이며, 개발 모듈의 구성요소 및 개발방안에 대한 설명은 다음과 같다.

- 1) 국내외 전문가 활용, 과거 사례 조사를 토대로 복구 전략 방안 수립
  - 문헌조사를 통해 지진 발생 시 용수공급 시스템의 피해양상 파악
  - 국내외 전문가, 해외 지진 복구 사례 등 관련 자료를 분석하여 지진발생 후 복구과정 분석
- 2) 시스템의 복원력 향상 방안 연구
  - 복원력 향상을 위해 필요한 자원 (전문 복구 인력, 장비 확보, 복구 재료 등) 연구

- 복구 우선순위 결정을 위한 Recovery Priority Rule 구성
- 시스템 복구양상을 정량화 할 수 있는 지수 개발 (Restoration curve)

### 3) 실제 상황을 재현할 수 있는 가상 시뮬레이션 모듈 개발

- 모형 내 시스템복원 시뮬레이션 모듈 연동
- 시스템 복원을 위해 필요한 인력, 장비, 물품 등을 컴퓨터 기반 모형의 입력자료로 구성
- 몬테카를로 (Monte-Carlo) 시뮬레이션을 이용한 모듈 개발

### 2.3 타 라이프라인 시스템과의 연계, 적용가능성 검토

지진재해가 발생하였을 경우, 그 피해는 용수

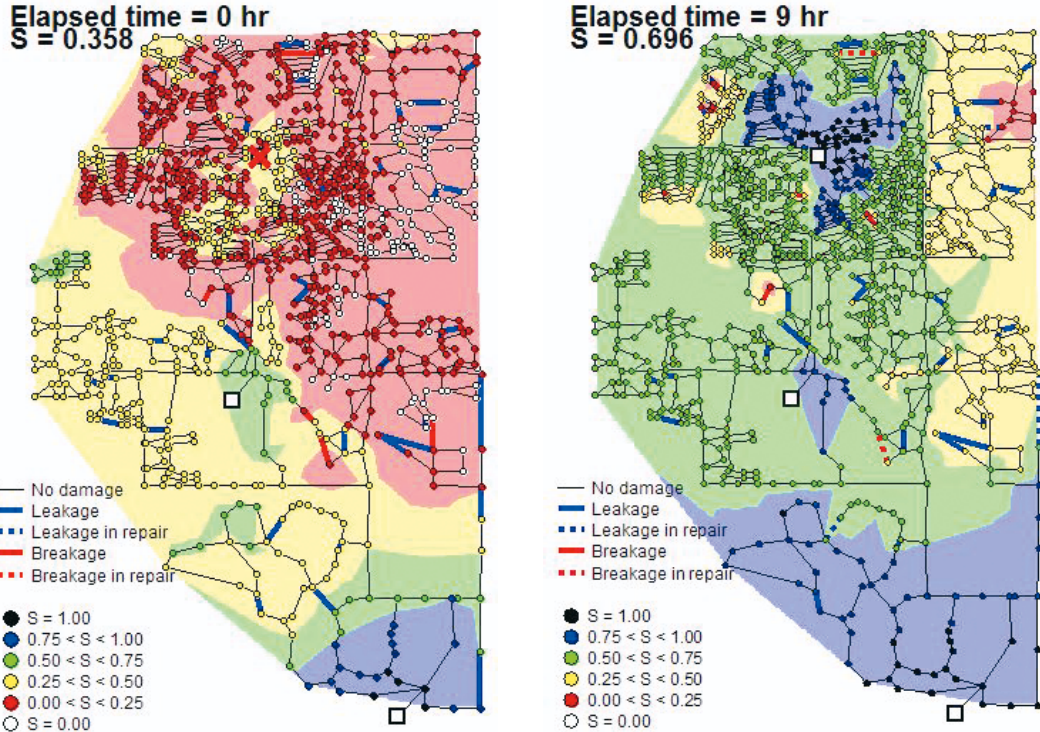



그림 5. 지진발생 후 시간에 따른 시스템의 복구 양상 (신뢰도 지수, Serviceability)

공급 시스템뿐만 아니라, 전력, 통신, 도로 및 교통 등 여타 사회기반시설에도 발생한다. 이들 시설물들은 서로 연계(interdependent)되어 있어 어느 한 시스템의 손실은 다른 시스템의 피해 및 복구에도 영향을 미치게 되므로 이들 라이프라인 시스템을 연계, 통합하여 지진 대응 연구를 수행할 수 있는 방안을 모색하여야 한다. 본 연구로부터 개발될 모형을 기반으로 “(가칭)한국형 지진대응 라이프라인 시스템 설계, 복원 모형”을 구축할 수 있는 연구기초를 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 결론

지진재해는 다른 재해(홍수, 가뭄 등)에 비해 발생확률이 상대적으로 낮지만, 일정 규모 이상의 지진이 발생하였을 경우, 그 피해규모는 우리의

상상을 초월한다. 이웃나라인 일본이나 대만과 비교하였을 때, 현재 국내에는 지진재해에 대비하기 위한 사전 용수공급 시스템의 보강, 설계 기법이 라든지 지진 발생 후 시스템의 복원을 위한 전략이 제대로 갖추어져 있지 않은 상황이다. 이러한 상황에서 지진이 발생한다면, 자칫 사회시스템 전반의 마비로 이어질 수 있는 상황임을 직시할 필요가 있다. 본고에서는 컴퓨터를 기반으로 지진재해에 대비한 용수공급 시스템의 (사전) 설계, 보강 및 (사후) 신속 대응, 복원을 위한 프로그램의 개발 방안에 대하여 소개하였다. 개발될 모형은 상수관망 GIS시스템과 연동하여 Risk-free, Virtual 환경에서 구현이 가능한 가상 시뮬레이션 프로그램이다. 과거 한반도에서 발생한 지진의 위치, 강도, 양상 등을 고려함은 물론이고, 해외 지진관련 연구 결과를 면밀히 분석, 적용함으로써 실무자의 훈련, 교육 및 연구의 목적으로 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 

### 참고문헌

1. 기상청 (Korea Meteorological Administration, KMA) (2012). <http://www.kma.go.kr>.
2. 유도근, 강두선, 김중훈 (2013). “상수관망 지진재해 신뢰성 평가 모형 - REVAS.NET”, 한국수자원학회지 ‘물과미래’ 2월호, 한국수자원학회.
3. 이도형, 전정문, 오장균, 이두호 (2010). “매설가스배관의 지진 취약도 해석”, 한국지진공학회 논문집, 제14권, 제5호, pp. 65-76.
4. 이형진, 박병희, 장일영 (2006). “GIS 및 지진취약도 분석기법을 이용한 교통 네트워크의 방재 시스템”, 한국방재학회 논문집, 제6권, 제2호, pp. 25-35
5. 한국상하수도협회 (2010). 상수도시설기준. 환경부.
6. 환경부 (2007). “상수도통계”, 환경부
7. Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1997). *HAZUS97 Technical Manual*.