

상수관망 지진재해 신뢰성 평가 모형 - REVAS.NET



유도근 |

고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정
godqhr425@naver.com



강두선 |

수원대학교 토목공학과 교수
doosunkang@gmail.com



김중훈 |

고려대학교 건축사회환경공학부 교수
jaykim@korea.ac.kr

1. 서론

지진은 인간이 통제할 수 없는 자연재해의 하나로 경제, 사회 전반에 걸쳐 막대한 손실을 일으킨다. 특히 지진에 의한 피해는 개별 건물뿐만 아니라 국가기반시설인 상하수도, 전력, 교량 및 교통 시스템 등과 같은 라이프라인(Lifelines)에 크게 나타날 수 있으며, 이러한 라이프라인의 파괴는 시설물 자체의 직접적인 손상과 동시에 사회 전반적으로 시스템의 장기적인 마비를 야기할 수 있다는 점에서

그 중요성이 높다고 할 수 있다.

2002년 범미보건기구 (Pan American Health Organization, PAHO)의 「Emergencies and Disaster in Drinking Water Supply and Sewerage Systems: Guidelines for Effective Response」보고서에서는 지진, 화산폭발, 산사태, 태풍, 홍수, 가뭄 등의 자연재해로 인한 상수도시설물의 피해 양상과 함께 상수도시스템에 미치는 피해의 정도를 분석한 바 있다. 제시된 연구결과에서는 상수도시설물에 미치는 자연재해로 인한 피해의 정도는 그 재해의 발생빈도와 강도에 따라 차이가 있겠지만 지진, 태풍, 홍수 등에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 특히 지진에 의하여 구조적인 1차 피해에 따른 공급량 감소와 함께 화학적 오염 등의 2차 피해가 크게 나타날 수 있음을 언급하였다. 이를 뒷받침 하듯이 1994년과 1995년에 발생했던 미국의 노스리지(Northridge) 지진과 일본의 고베(Kobe) 지진은 상수도 시설에 막대한 피해를 입힌바 있다. 로스앤젤레스시 수도 전력국 (Los Angeles Department of Water and Power, LADWP)과 캘리포니아 메트로 상수도국 (Metropolitan Water District of Southern California, MWD)의 600mm이상 간선 중 74개 지점이 막대한 피해를 입었으며, 로스앤젤레스시 수도 전력국 배수관망 시스템 중 1,013개 지점이 지진으로 인해 수리되었다. 고베시의 경우 상수원

의 약 75%는 요도(Yodo)강에서 두 개의 도수관을 통하여 공급받았으나, 지진발생 후 공급이 중단되어 1,500만 명의 주민이 용수공급을 받을 수가 없어 타 지역으로 대피하였다. 지름 1.25m의 도수관은 콘크리트로 되어 있었으나, 모두 23곳에서 파손이 발생하였으며, 일부 가압장과 정수장도 붕괴되었다.

한국의 경우 환태평양 지진대 중에서도 지진과 연관된 화산활동이 매우 활발한 일본열도에 근접해 있지만 일본에 비하여 지진이 거의 없는 나라로 인식되어 왔다. 실제로 국내의 경우 실제 상수도시설에 영향을 미칠만한 규모의 지진이 없었기 때문에 몇몇의 유사피해사례를 제외하고는 지진에 의한 상수도시설의 피해사례가 거의 보고되지 않았다. 그러나 기상청 (Korea Meteorological Administration, KMA)의 1978년부터 2011년까지의 연도별 국내 지진 발생 횟수 보고서에 따르면 지진의 총 횟수가 증가하는 추세에 있음을 알 수 있으며, 2005년 일본 후쿠오카 서쪽 앞바다에서 발생한 강도 7(Richter magnitude, 7)의 지진은 부산을 포함한 남동쪽 해안지역 대도시지역의 주민들이 지반의 흔들림을 감지할 정도로 우리나라에 영향을 미쳤다. 이에 따라 지진피해의 가능성에 대한 우려가 증가되고 있으며, 지진재해가 발생하였을 경우 신속한 대책을 마련해야 한다는 필요성이 부각되고 있다.

이에 발맞추어 국내의 경우 전력망, 교통망, 교량과 같은 라이프라인 시스템에 대한 내진기준이 강화, 보완 되고 있으나, 타 토목구조물에 비하여 수도시설물에 대한 내진 기준이 상대적으로 부족한 형편이다. 환경부는 2010년 상수도시설기준을 개정하면서 지진에 대비한 상수도 시설의 구축을 위하여 지진관련 시설기준을 별도의 장으로 마련하여 정리하였으며, 지진 시 상수도시설의 급수 기준을 최대한 확보하고 2차 재해를 발생시킬 가능성을 최소화하기 위해 내진성능 확보에 필요한 최소설계요건을 신설하였다. 그러나 대부분 각 시설물 별로 일반적이며 원론적인 내용만 기술되어 있으며, 지진

에 대한 상수관망 시스템의 전반적인 신뢰성을 산정하고 이를 평가하는 기법은 제시되어 있지 않다.

본고에서는 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 소개하고자 한다.

2. REVAS.NET

REVAS.NET은 지진 재해에 대한 상수관망의 신뢰성을 확률적으로 산정하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS) 기법을 이용한다. 지진발생의 위치와 강도, 그리고 배수지, 양수시설, 관로의 피해 상태는 많은 불확실성을 지니기 때문에, 불확실한 상황에서의 확률적 모의실험에 많이 활용되는 MCS기법이 적합하다. REVAS.NET에서는 다양한 프로그램 언어와의 연계 및 소스 코드 수정이 가능한 EPANET DLL (EPA, 2000)을 이용하여 상수관망 수리해석을 수행한다. 반복 계산을 위한 프로그램 언어는 Visual Basic 6.0을 적용하였다. REVAS.NET 모형의 공간적 적용 범위는 정수 처리된 물을 공급하는 상수관망으로 한정된다. 따라서 대상 구성요소는 송수관, 배수지, 고가수조, 양수시설, 배수관으로 구성되며, 밸브, 유량계 등의 기타 부속시설의 경우 대상 구성요소에서 제외하였다. 시간적 해석 범위의 경우 지진발생 직후의 상수관망 시스템의 신뢰성을 평가하기 위하여 상수관망의 수리해석은 단일시간 분석(Steady State Analysis)을 실시한다. 지진에 대한 신뢰성 평가를 위해서는 상수관망 기본자료 및 구성요소의 지진 취약도 정보, 지진 발생 모형, 수리해석 모형, 그리고 신뢰도 지수가 필요하다. REVAS.NET 모형의 흐름도는 그림 1과 같으며, 각 절차에 대한 설명은 다음과 같다.

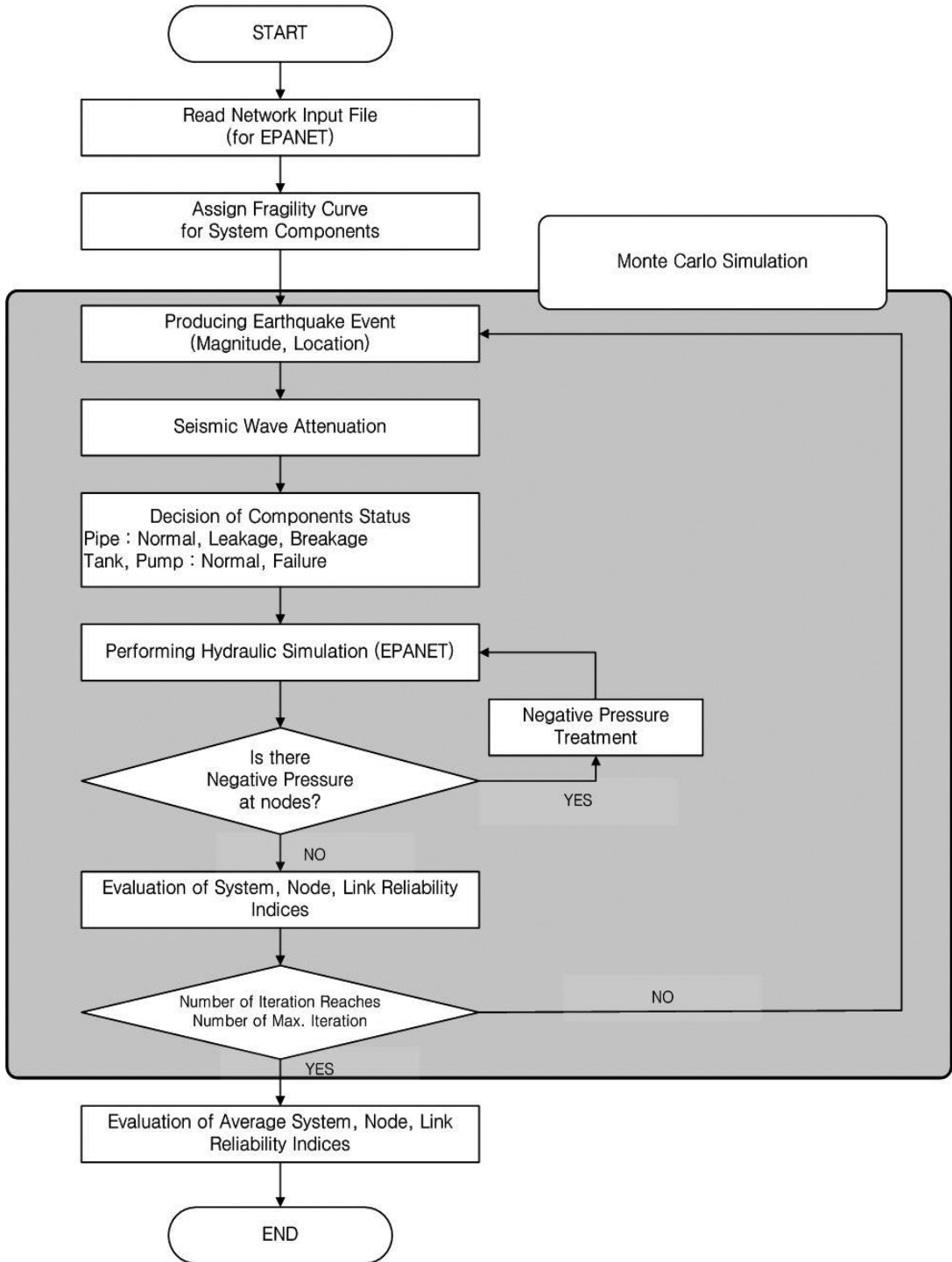


그림 1. REVAS.NET 흐름도

1) 적용지역 관망도 및 기본자료 구축

우선 적용 지역에 대한 관망도를 구축하고 수리 해석을 위한 입력 인자들을 결정한다. 특히, 관망도를 통하여 배수지, 양수시설, 그리고 관의 위치정보가 미리 파악되어 있어야 한다. 본 프로그램의 관 중앙절점 좌표는 관 양쪽 끝단 절점 위치의 중앙점으로 계산된다. 그리고 관의 파손 확률을 결정하기 위하여 필요한 관경, 관종, 관 매설지형, 액상화 조건 등의 자료를 수집한다.

2) 상수도 시스템 구성요소 별 취약도 함수 구성

지진 발생 후 상수도 시스템 구성요소의 상태를 결정하기 위해 취약도 곡선(Fragility Curve)이 사용된다. 취약도 곡선은 구조적 또는 비구조적 피해 상태가 일정수준을 넘을 확률을 정의하는 함수이다. 일반적으로 대부분 건물의 취약도 곡선은 대수 정규(Log-normal) 누적확률분포함수로 설정되며, 최대지반가속도 (Peak Ground Acceleration, PGA)에 의한 파괴확률로 나타낸다. 이와 같은 취약도 곡선은 구조해석, 실험, 과거 피해자료, 전문가의 의견 수렴 등을 통하여 도출될 수 있다. 미국 라이프라인연합(American Lifelines Alliance, ALA; 2001)는 상수관망 구성요소 중 배수지와 양수시설에 대한 취약도 함수를 제시한바 있다. 지중에 매설된 관의 취약도는 건물의 취약도 곡선과 달리 수리율(Repair Rate, RR; No. of repairs / Length)로 나타내며, 지진파의 진행에 따라 나타나는 최대지반속도(Peak Ground Velocity, PGV)에 의한 취약도 식과 영구지반변형(Permanent Ground Deformation, PGD)에 의한 취약도 식으로 표현된다.

3) 지진 모의 발생 (위치 및 강도)

해당 지역의 특성에 맞는 지진을 모의 발생시키

기 위해서는 적절한 지진 발생 모형이 필요하다. 특히 지진 모의는 진앙의 위치와 강도가 가장 중요한 인자이다. 본 모형에서는 과거 지진활동이 그 지역 지진 활동을 대표하고, 작은 지진의 분포로부터 큰 지진의 발생 가능 위치를 판단할 수 있다 는 전제(Kafka et al. 2000)를 이용하여 과거 지진발생 위치를 바탕으로 발생가능한 지진의 발생 위치를 모의하였다. 지진 강도의 경우, REVAS.NET에서는 지진 모의에 많이 사용되는 Doubly Truncated Gutenberg-Richter 분포(Cosentino et al. 1977) 뿐만 아니라 정규분포(Normal Distribution)와 특정 강도(Specific Magnitude) 모의 방법 중 선택하여 적용할 수 있도록 하였다.

4) 지진파 감쇠

모의된 지진파는 진앙으로부터 상수관망의 구성요소 위치까지 도달하는 동안 거리에 따라 감쇠된다. 이와 같은 지진파의 감쇠정도를 정량화하기 위해 REVAS.NET에서는 Kawashima et al. (1984), Baag et al. (1998), 그리고 Lee and Cho (2002)에 의해 제시된 바 있는 세 가지 지진파 감쇠식을 선택적으로 적용할 수 있도록 하였다.

5) 구성요소 상태 결정

앞서 언급한 바와 같이, 지진이 발생되면 진앙으로부터 각 배수지와 양수시설의 위치까지 지진파의 감쇠가 일어나게 되며, 지진파 감쇠식에 의해 각 배수지와 양수시설의 최대지반가속도(PGA)가 결정된다. 따라서 최대지반가속도(L, external forces)가 취약도(R, resistance)보다 크게 되면 해당 시설은 제 기능을 할 수 없게 되며 파괴상태로 고려한다. 반대로 지진파의 강도가 취약도보다 작거나 같게 되면 해당 시설은 미약한 피해가 있을지라도 본연의 기능은 충분히 수행할 수 있으므로 정상상태로 고려된다. 그러나 관로는 다른 시설물과 다르게

최대지반속도(PGV)에 의하여 수리율(RR)이 결정되게 된다. 따라서 계산된 최대지반가속도의 값을 최대지반속도로 변환하는 작업이 필요하게 된다. REVAS.NET에서는 Newmark(1973)과 Seed et al.(1975)이 제시한 지반 유형에 따른 속도에 대한 가속도 비를 사용하여 해당 지진에 의해 발생하는 각 관로의 수리율을 도출한다. REVAS.NET에서는 도출된 수리율과 관로의 파괴 및 누수 확률식을 고려하여, 지진 피해에 의한 관로의 상태를 정상(normal), 누수(leakage), 그리고 파괴(breakage)의 세 가지로 구분하여 모의한다.

6) EPANET 수리해석 수행

지진에 의한 각 구성요소의 상태가 결정되면, 이를 관망해석 프로그램에 적절히 반영하여 수리해석 결과를 도출해야 한다. 배수지와 양수시설의 파괴가 결정되면, 수리해석 시 사용되는 EPANET 상의 배수지의 파괴는 배수지와 직접 연결된 모든 관로를 닫는 것으로 구현되며, 양수시설의 파괴는 해당 펌프의 운전 상태를 정지시키는 것으로 구현된다. 관로의 경우 관 상태가 누수 또는 파괴로 구분되므로 관의 누수 면적에 따른 누수량을 계산하여 이를 EPANET 입력인자로 적절히 고려해야 한다. REVAS.NET에서는 관의 누수량을 EPANET의 절점상에서의 Emitter Coefficient값을 조절하여 모의한다.

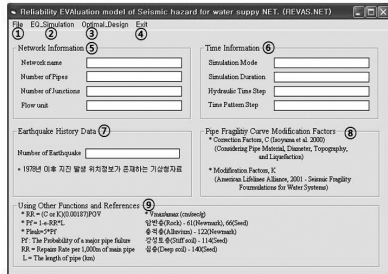
7) 부압처리

REVAS.NET에서는 관망 수리해석에 의해 부압이 발생할 경우, 부압이 발생한 절점의 기본수요량을 EPANET 모형에서 0의 값으로 설정하고, 수리해석을 재수행한다. 재해석 후 부압이 절점에 다시 나타날 경우에는, 해당 절점의 압력을 0의 값으로 최종 설정한다.

8) 구성요소 및 시스템의 수리학적 신뢰도 산정

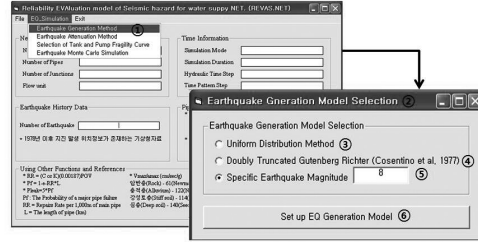
지진 모의 발생에 의한 관로, 배수지, 그리고 양수시설의 상태가 결정되고 이 상태를 수리해석모형에 입력하게 되면 상수관망 시스템의 수리해석 결과를 도출할 수 있게 된다. 그 결과를 정량화하기 위하여 신뢰성 인자를 사용하게 된다. 일반적으로 다양한 분야에서 광의적 개념으로 사용되고 있는 시스템의 신뢰도(Reliability)는 시스템이 정상적으로 작동을 할 확률을 의미한다. REVAS.NET에서는 신뢰성 인자로 상수관망 시스템에 적합하다고 알려진 Nodal Serviceability(NS)와 System Serviceability(SS)를 적용하였으며 (Cullinane et al. 1992, Tabucchi et al. 2010, 그리고 Lansey 2012), 추가적으로 Normal Status Rate of Link(NSRL), Normal Status Rate of Tank(NSRT), Normal Status Rate of Pump(NSRP)를 추가적으로 산정한다. System Serviceability(SS)는 지진 재해에 의한 시스템의 공급성을 평가하기 위한 인자로, 시스템 전체의 요구 수요량(Required demand)에 대한 공급 가능량(Available demand)의 비로 나타낸다. 이 값은 상수관망의 공급성을 나타내는 인자로 보통 가용성(Availability)이나 사용성(Serviceability)으로 정의되어 사용되는 인자이다. Nodal Serviceability(NS)의 경우, 수요절점에서는 절점 공급 가능량(Available nodal demand)과 절점 요구 수요량(Required nodal demand)의 비로 산정한다. 수요량이 없는 절점의 경우 재해발생 후의 압력과 최소요구압력(Allowable minimum nodal pressure)의 비로 절점의 사용성을 평가한다. 절점별 신뢰도 지수는 각 절점이 공급할 수 있는 공급량의 정도를 절점의 요구 수요량과 최소 압력을 기준으로 계산한 것으로, 절점별 공급가능성을 상대적으로 평가할 수 있다. Normal Status Rate of Link(NSRL), Normal Status Rate of Tank(NSRT), Normal Status Rate of Pump(NSRP)는 지진 모의에 의해 파괴되지 않고 정상적

- REVAS.NET Main Page



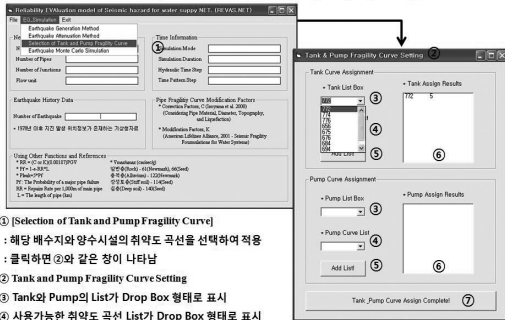
- REVAS.NET 프로그램의 메인 화면이며 각 부분에 대한 간단한 내용은 다음과 같다.
- ① File Input Menu Bar ④ Exit Menu Bar
- ② EQ Simulation Menu Bar ⑤ Display Network Info- ⑥ Methods Description for Decision of Pipe Fragility Modification Factor
- ③ Optimal Design Menu Bar ⑥ Display Simulation Time Info- ⑥ Other using Functions and References

- EQ Simulation Menu Bar [Earthquake Generation Method]



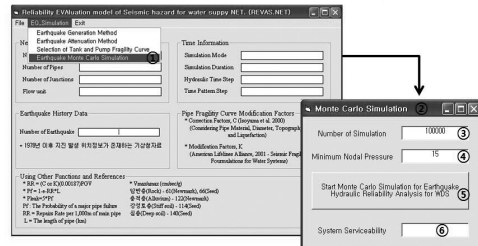
- ① [Earthquake Generation Method]
- ② 지진 발생 모형을 설정하기 위한 메뉴로 클릭하면 ②와 같은 창이 나타난다
- ③ Earthquake Generation Model Selection
- ④ Uniform Distribution Method ⑤ 사용하는 옵션
- ④ Doubly Truncated Gutenberg Richter를 사용하는 옵션
- ⑤ Specific Earthquake Magnitude를 사용하는 옵션
- ⑥ 설정을 완료하고 창을 비활성화 시림

- EQ Simulation Menu Bar [Selection of Tank and Pump Fragility Curve]



- ① [Selection of Tank and Pump Fragility Curve]
- ② 해당 배수지와 양수시설의 취약도 곡선을 선택하여 적용
클릭하면 ②와 같은 창이 나타난다
- ③ Tank and Pump Fragility Curve Setting
- ④ Tank와 Pump의 List가 Drop Box 형태로 표시
- ④ 사용가능한 취약도 곡선 List가 Drop Box 형태로 표시
- ⑤ 선택한 Tank와 Pump의 취약도 곡선을 적용하여 추가
- ⑤ 선택된 Tank와 Pump의 취약도 곡선이 화면에 표시
- ⑥ 설정을 완료하고 창을 비활성화 시림

- EQ Simulation Menu Bar [Earthquake Monte Carlo Simulation]



- ① [Earthquake Monte Carlo Simulation]
- ② 신뢰성 평가를 위한 Monte Carlo Simulation을 시작하기 위한 메뉴로 클릭하면 ②와 같은 창이 나타난다
- ③ Monte Carlo Simulation
- ④ Simulation의 횟수를 입력
- ④ 관망의 Minimum Nodal Pressure를 입력
- ⑤ Monte Carlo Simulation을 수행
- ⑥ 수행결과 나타나는 System Serviceability가 표시 (다른 수리인자들의 경우 Text 파일로 별도 저장)

그림 2. REVAS.NET 모형 구동 화면

으로 작동하는 관로, 배수지, 양수시설의 평균적인 비율을 나타내는 것으로 시스템을 구성하는 구성요소의 지진에 따른 안전률로 해석할 수 있다.

그림 2는 REVAS.NET 모형의 사용자 인터페이스(Graphical User Interface) 중 메인 화면과 자료 입력 및 옵션 선택의 일부 화면을 나타내고 있다.

3. 국내 적용 예 소개

개발된 REVAS.NET 모형을 실제 상수관망 시스템에 적용하였다. 지진 시나리오는 그림 3과 같이 과거 J시에 발생했던 지진 발생 위치 중 시스템과 가장 근접한 곳에 강도 7의 지진이 발생한 것으

로 가정하였다. REVAS.NET 모의 결과 시스템의 신뢰도(System Serviceability, S_s)는 0.305로 나타났다. 해석하면, 모의된 시나리오와 같은 지진이 발생할 경우, 공급층의 측면에서 J시의 총 인구(약 600,000명)의 70%인 약 420,000명이 물 공급을 받지 못한다는 것을 의미한다. 또한 관로와 배수지의 정상작동 확률을 살펴보면, 평균적으로 전체 관의 약 37%가 누수 또는 파괴되어 제 기능을 할 수 없게 되며, 배수지의 경우도 약 40% 정도가 제 기능을 하지 못하고 파괴되는 것으로 나타났다. 이것은 전반적인 상수관망의 기능이 마비된다는 것을 의미하며, 전력 공급 시스템과 교통망 등의 타 라이프라인의 피해 정도에 따라 도시 전체의 기능이 마비될 수 있음을 시사한다.

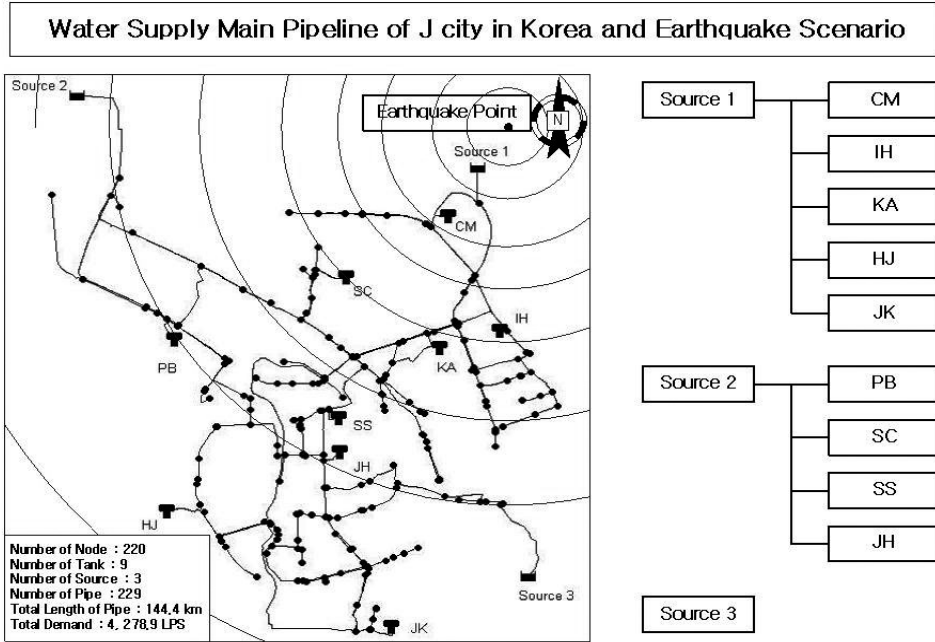


그림 3. J시의 상수 관망도 및 적용 시나리오

그림 4는 해당 시나리오 적용 결과로 나타나는 관로 및 절점의 신뢰도 인자인 Normal Status Rate of Link(NSR_l)와 Nodal Serviceability(N_s)의 공간적인 분포를 나타낸다. Normal Status Rate of Link(NSR_l)의 공간적 분포를 살펴보면, 지진 발생 위치와 가깝고 배수지 및 수원과 연결된 상대적으로 길이가 긴 관로의 절점부근에서 낮게 나타나는 경향을 보인다. Nodal Serviceability

(N_s)의 경우, 진원과의 거리와는 크게 상관없이 절점까지의 공급 경로가 하나인 지점에서 상대적으로 낮은 신뢰도를 나타냈다. 이와 같이, REVAS.NET 모형을 이용한 가상 시뮬레이션을 통해 지진재해에 의한 상수관망의 신뢰도를 정량화 할 수 있으며, 신뢰도의 공간적 분포를 한눈에 파악하여 분석할 수 있다.

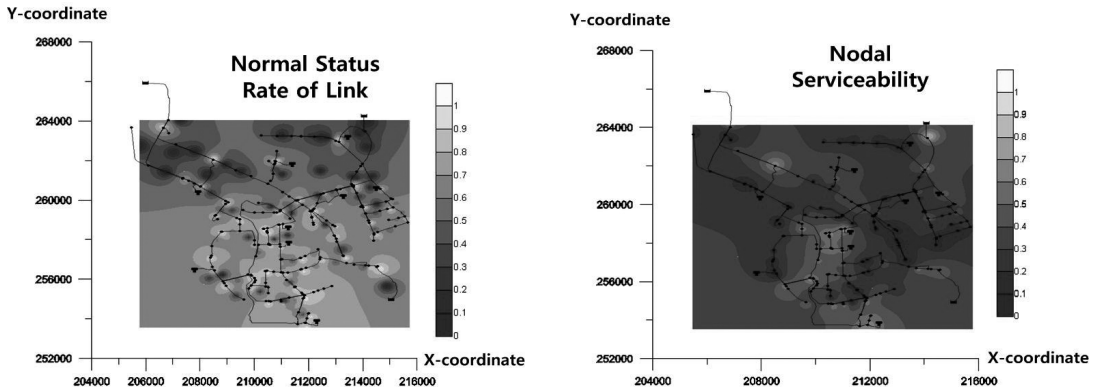


그림 4. J시 상수 관망 지진재해 신뢰도의 공간적 분포

4. 결론

본고에서는 지진 재해를 고려한 상수관망시스템의 신뢰성 평가 모형인 REVAS.NET을 소개하고 국내 실제 상수관망에 적용된 예를 간단히 살펴보았다. REVAS.NET은 대상 시스템에 적합한 지진을 확률적 모의기법을 사용하여 발생시키고, 이에 대한 상수관망의 수리학적 신뢰도를 적합한 지수를 통하여 산정한다. 이와 같은 지진재해에 대한 신뢰

도 정량화 프로그램은 현재 시스템의 상태를 객관적으로 평가할 수 있을 뿐 만 아니라, 이 결과를 바탕으로 향후의 유지관리 및 보강계획을 수립하는데 유용한 도구로 사용될 수 있다는 장점을 갖고 있다. 따라서 타 토목시설물에 비하여 내진 기준 및 지진 재해에 대한 대비가 상대적으로 부족한 국내 수도 시설물에 대하여 국내에서는 처음 개발된 REVAS.NET이 적용될 경우 기술적, 경제적으로 활용가치가 클 것으로 기대된다. ☺

참고문헌

1. 기상청 (Korea Meteorological Administration, KMA) (2012). <http://www.kma.go.kr>.
2. 한국상하수도협회 (2010). 상수도시설기준. 환경부.
3. American Lifelines Alliance (2001). Seismic Fragility Formulations for Water Systems Part 1 Guideline, American Lifeline Alliance, Washington, D. C..
4. Baag, C. E., Chang, S. J., Jo, N. D., and Shin, J. S. (1998). Evaluation of Seismic Hazard in the Southern Part of Korea. International Symposium on Seismic Hazards and Ground Motion in the Regional of Moderate Seismicity, pp. 31-50.
5. Cosentino, P., Ficarra, P., and Luzio, D. (1977). Truncated Exponential Frequency-magnitude Relationship in Earthquake Statistics. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 67, No. 6, pp. 1615-1623.
6. Cullinane, M. J., Lansley, 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.
7. Kafka, A. L. and Levin, S. Z. (2000). Does the Spatial Distribution of Smaller Earthquakes Delineate Areas Where Larger Earthquakes are likely to Occur? Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 90, No. 3, pp. 724-738.
8. Kawashima, K, Aizawa, K., and Takahashi, K. (1984). Attenuation of Peak Ground Motion and Absolute Acceleration Response Spectra. Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), San Francisco, pp. 257-264.
9. Lansley, K. E. (2012) Sustainable, Robust, Resilient, Water Distribution Systems. Proceedings of the 14th Water Distribution Systems Analysis Symposium, Engineers Australia, Adelaide, Australia.

10. Lee, K. and Cho, K. H. (2002). Attenuation of Peak Horizontal Acceleration in the Sino-korea Craton. Proceedings of the Annual Fall Conference of Earthquake Engineering Society of Korea, pp. 3-10.
11. Newmark, M. (1973) A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra. Directorate of Licensing, U.S Atomic Energy Commission, Washington, D. C..
12. Pan American Health Organization (PAHO) (2002). Emergencies and Disaster in Drinking Water Supply and Sewerage Systems: Guidelines for Effective Response. Regional Office of the WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), Washington, D. C., 104 pp.
13. Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 User's Manual. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), Cincinnati, OH.
14. Seed, H. B., Muraka, R., Lysmer, J., and Idriss, I. (1975). Relationship between Maximum Acceleration, Maximum Velocity, Distance from Source and Local Site Conditions for Moderately Strong Earthquake. Report No. EERC75-7, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkely, CA.
15. Tabucchi, T, Davidson, R., and Brink, S. (2010). Simulation of Post-earthquake Water Supply System Restoration. Civil Engineering and Environmental Systems, Vol. 27, No. 4, pp. 263-279.