보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( ) 발간등록번호

국토교통기술촉진연구사업

R&D / 17CTAP-C129748-01

네트워크 기반 라이프라인 지진 재해 기능저하 예측 모델 최종보고서

2019. 3. 26.

주관연구기관 / 서울대학교 산학협력단

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘네트워크 기반 라이프라인 지진 재해 기능저하 예측 모델’(연구개발 기간 : 2017.04.01 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서(보완본) 1부를 제출합니다.

2019. 03. 26.

주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단 (대표자) 윤의준 (인)

주관연구기관책임자: 박문서

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C129748-01	해당 단계 연구 기간	2018.01.01. ~2018.12.31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천지원유형			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	네트워크 기반 라이프라인 지진 재해 기능저하 예측 모델			
연구책임자	박문서	해당단계 참여 연구원 수	총: 11명 내부: 11명 외부: 0명	해당단계 연구비	정부: 184,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 184,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 0명	총 연구비	정부: 320,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 320,000천원
연구기관명	서울대학교 산학협력단				
국제공동연구	-				
위탁연구	-				
※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음					
연구개발성과 보안등급 및 사유	일반 (국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제 24조의 4 제 1항에 해당하지 않음)				

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록・기탁 번호			-	-	-		-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

구입기관	연구시설・장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

요약	보고서 면수
▪ 본 연구는 국내에서 지진 발생이 가장 잦은 경상북도 일부 지역에 위치한 전력시설과 상수도 시설을 대상으로 발전소, 변전소, 취수장, 정수장을 거점시설(Node)로, 배전선로 및 배수관을 연결경로(Link)로 하는 네트워크 지도를 개발함. ▪ 더불어 본 연구는 단일 시스템이 아닌 서로 다른 라이프라인 시스템의 연쇄 피해를 고려하기 위하여 라이프라인 시스템의 기능 저하를 유발하는 피해사건 간의 인과관계를 표현하는 라이프라인 네트워크의 피해 파급 베이지안(Bayesian) 모형을 작성하며, 이를 기반으로 라이프라인 네트워크의 강건성 예측 모델을 개발함. ▪ 즉 본 연구는 지진재해로 인한 라이프라인시스템 기능저하의 개념을 정립하고 피해진단 예측 모델을 개발함으로써 구조진단 또는 사후대응 중심의 현행 재해진단 도구의 한계를 보완하고 지진 이후 전기, 수도 등 공공 서비스의 재개 시점을 예측하여 최종수요자 입장에서의 재난대응 정보 제공을 지원 할 수 있음.	96

〈 국문요약 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구는 지진에 대한 국민 불안을 잠재우고 공공서비스 공급 지속성을 확보하기 위하여, 지진 재해 이후 전력, 수도 등 주요 라이프라인시스템의 기능 저하를 예측하는 모델을 개발하는 것을 최종 목표로 함. ▪ 구체적으로, 연구 1차년도에서는 국내 주요 라이프라인시스템의 네트워크 지도를 구축하며, 시스템 단일 구성요소의 지진 취약도 평가 모듈을 개발함. 그 후 라이프라인 시스템 기능 저하를 유발하는 피해 사건 및 인과관계를 표현하는 라이프라인 네트워크의 피해 파급 베이지안 모형을 작성함. ▪ 연구 2차년도에서는 지진 시나리오에 따른 라이프라인 네트워크의 강건성 예측 모델을 개발하고 기능저하정도 및 지역별 최종수요자의 분포를 나타내는 시각화 모듈을 개발함. 또한 개발된 모델의 검증을 수행하며, 개발 모델을 활용하여 라이프라인 시스템의 지진재해를 완화하기 위한 라이프라인 네트워크 회복탄력성 확보 방안을 제안함.
연구개발성과	▪ 국내 주요 라이프라인시스템 네트워크 지도 ▪ 라이프라인 시스템 구성요소 지진 취약도 평가 모듈 ▪ 라이프라인 시스템 네트워크 지진재해 기능저하 예측 모델 ▪ 라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	▪ 본 연구를 통해 기반시설유지 분야 국가기술수준을 향상시킬 수 있으며, 안전서비스 시장을 구조 진단 예측 분야에서 도시복원력 확보 분야로 확장시킬 수 있음. ▪ 또한 본 연구는 최종 수요자 중심 재해 진단을 통해 피해 지역 공공 서비스 수급이 얼마나 저하될 것인지 정보를 제공하여 지역 단위 재난 대응 의사 결정을 지원함.

핵심어	라이프라인 시스템	네트워크	지진 재해	기능저하

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	In the aftermath of an earthquake, functional-loss estimation of seismic damaged lifeline system is the first step for the emergency response. In this context, this research suggests network estimation model with nodes represented as each facility and links represented as interactions between them for the comprehensive understanding of how an individual facility's damage propagate to whole lifeline system performance. ▪ Select an area of interest for the geospatial analysis. ▪ Collect quality data sets from different sources. (e.g, Korea National Spatial Data Infrastructure Portal) ▪ Build the network model that describes the lifeline system in Korea. ▪ Modify the seismic fragility curve introduced by HAZUS considering unexpected cascade failure effect. ▪ Develop and validation the functional loss estimation model for the seismic-damaged lifeline system.
Results	▪ Lifeline system network model ▪ Seismic fragility curve considering unexpected cascade failure effect ▪ Functional loss estimation model for the seismic-damaged lifeline system ▪ Mitigation plan from a perspective of the network's reliability
Expected Contribution	This research enhances the level of national technical maturity in the field of infrastructure maintenance. In addition, proposed model enables a person who lives in the disaster area to estimate and prepare the additional functional loss.

Keywords	Lifeline System	Network	Seismic-damage	Functional Loss

목 차

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

1-1. 연구개발 배경 및 필요성 ····· 1

1-2. 연구개발 목적 ····· 4

1-3. 연구개발 범위 ····· 6

2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 9

2-1. 국내 관련 연구 및 산업 동향 ····· 9

2-2. 국외 관련 연구 및 산업 동향 ····· 11

2-3. 연구제안의 기술개발성숙도 ····· 13

3. 연구수행내용 및 성과 ····· 14

3-1. 연차별 연구개발 목표 및 내용 ····· 14

3-2. 연구 수행 방법 및 절차 ····· 15

3-3. 세부 연구 수행 내용 ····· 17

가. 국내 주요 라이프라인 시스템 네트워크 지도 ····· 17

나. 라이프라인 시스템 구성요소 지진 취약도 평가 모듈 ····· 27

다. 라이프라인 시스템 네트워크 지진재해 기능저하 예측 모델 ····· 41

라. 라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책 ····· 54

마. 연구 수행 결과에 대한 전문가 및 사용자 평가 ····· 59

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 65

4-1. 연구개발성과 목표 및 달성도 ····· 65

4-2. 관련 분야 기여도 ····· 71

5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 73

5-1. 연구개발성과의 활용방안 ····· 73

5-2. 기대효과 ····· 75

5-3. 추가연구 필요성 ····· 77

6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 78

7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 79

8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 ····· 79

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 79

10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 80

11. 기타 사항 ····· 93

12. 참고문헌 ····· 94

<표 차례>

[표 1] 본 연구의 분석대상지역 정보 ····· 6

[표 2] 안전 서비스 관련 시장 규모 (The Freedonia Group, 2014) ····· 9
[표 3] 선행 국가연구개발과제 현황 ····· 10
[표 4] 라이프라인 피해 진단 관련 국외 상용 프로그램 ····· 12
[표 5] 본 연구 제안의 착수 전과 종료 후 예상되는 기술개발성숙도 ····· 13

[표 6] 본 연구에서 활용하는 데이터 항목 ····· 18
[표 7] 대구경북지역 전력 네트워크 구성요소 상세 정보 ····· 22
[표 8] 대구지역 상수도 네트워크 구성요소 상세 정보 ····· 24
[표 9] 본 연구에 사용된 지진동 감쇠함수 ····· 28
[표 10] 경주지진 당시 관측소에서 계측된 최대지반가속도와의 비교 ····· 31
[표 11] 본 연구에서 활용하는 지진 취약도 함수 ····· 33
[표 12] 변전소의 손상단계별 서비스제공가능도 ····· 36
[표 13] 상수도 네트워크 구성요소의 손상단계별 서비스제공가능도 ····· 37
[표 14] 본 연구가 제안한 지진 취약도 평가모듈과 경주, 포항지진의 비교 ····· 39
[표 15] 일본 지진 당시 라이프라인 시스템 간 피해파급 사례 (Tsuruta et al., 2008) ·· 41
[표 16] 상수 분배 감소 사건 {True, False}의 조건부 확률 ····· 47
[표 17] 본 연구 개발 모델의 하위 모듈 요약 및 단계별 검증방안 ····· 53
[표 18] 공통원인피해 10% 증가 시 네트워크 강건성 ····· 56
[표 19] 복구 우선순위에 따른 라이프라인 서비스 회복 ····· 57
[표 20] 1차년도 전문가 적정성 평가 결과 및 의견 반영 방안 ····· 59
[표 21] 중간모니터링 평가의원 의견 및 수정보완 반영 내용 ····· 62
[표 22] 2차년도 전문가 적정성 평가 결과 및 의견 반영 방안 ····· 63

<그림 차례>

[그림 1] 경주, 포항지진 당시 사회기반시설 피해 사례 ····· 1
[그림 2] 2015년 네팔 지진 피해 진단 Timeline ····· 2
[그림 3] 라이프라인시스템(전력계통) 연쇄 피해의 예시 ····· 2
[그림 4] 연구개발 목표 및 핵심성과 ····· 4
[그림 5] 본 연구의 분석대상지역 분포 ····· 7
[그림 6] 본 연구의 분석대상 라이프라인시스템 및 구성요소 ····· 7
[그림 7] 본 연구의 시간적 분석 범위 ····· 8

[그림 8] 라이프라인시스템 특성 데이터베이스 예시 : 전력네트워크 ····· 19
[그림 9] 대구경북지역의 전력 및 상수도 네트워크 2D 지도 ····· 20
[그림 10] 대구지역의 전력 및 상수도 네트워크 2D 지도 상세 ····· 21
[그림 11] GIS 맵핑 네트워크 지도 예시 : 한울 원자력발전소 ····· 25
[그림 12] 대구·경북지역 라이프라인 네트워크 지도 SW 대표화면 ····· 26
[그림 13] 진앙거리와 진원거리 ····· 27
[그림 14] 진앙거리에 따른 최대지반가속도 감쇠 (경주지진) ····· 30
[그림 15] 본 연구의 지진동 감쇠 예측식과 실제 계측값과의 비교 ····· 31
[그림 16] 발전소의 지진 취약도 함수 ····· 34
[그림 17] 345kV 변전소의 지진 취약도 함수 ····· 34
[그림 18] 154kV 변전소의 지진 취약도 함수 ····· 34
[그림 19] 정수장의 지진 취약도 함수 ····· 35
[그림 20] 저수탱크의 지진 취약도 함수 ····· 35
[그림 21] 가압장의 지진 취약도 함수 ····· 35
[그림 22] 국내 변전소의 4Bank 시스템 구성도 ····· 36
[그림 23] 라이프라인 단일 구성요소의 손실예측함수 ····· 38
[그림 24] 지진 규모에 따른 라이프라인 단일 구성요소 피해 발생 확률 ····· 39
[그림 25] 라이프라인 구성요소 간 상호의존도 도식화 ····· 41
[그림 26] 라이프라인 시스템 내 세 가지 피해유형 ····· 42
[그림 27] 본 연구의 베이지안 모형 도식화 ····· 44
[그림 28] 네트워크 구성요소 간 상호의존도 예시 (투입물량) ····· 45
[그림 29] 네트워크 구성요소 간 상호의존도 예시 (연결경로 간 거리) ····· 46
[그림 30] 저수탱크로의 상수유입감소=True일 때 상수 흐름 예시 ····· 47
[그림 31] 라이프라인 피해파급 예측을 위한 베이지안 모형 SW ····· 48
[그림 32] 지진 규모에 따른 전력 및 상수도 네트워크 강건성 예측 결과 ····· 49
[그림 33] 라이프라인 네트워크 기능저하 시각화 모듈의 예시 ····· 50

[그림 34] 라이프라인 네트워크 회복탄력성 확보 방안 ····· 54
[그림 35] 라이프라인 네트워크 연결방식 예시 ····· 55
[그림 36] 네트워크 연결방식에 따른 강건성 변화 ····· 57
[그림 37] 전력 및 상수 분배 공급 측면에서의 중요 구성요소 식별 ····· 58

[그림 38] 네트워크 기반 지역 단위 재난 대응으로의 확장 ····· 71

[그림 39] 재난 진행단계별 본 연구 성과물의 활용방안 ····· 73
[그림 40] 후속 연구로의 확장 방안 ····· 77

[그림 41] 2018 ISDC 학회 참석 및 발표 ····· 78

제1장. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발 배경 및 필요성

❑ 반복되는 자연재해로 사회기반시설 안전성에 대한 우려 증가

- 총 100차례에 이르는 여진을 동반한 2017년 11월 15일 포항지진(본진 리히터 규모 5.4)은 2016년 9월 경주지진(본진 리히터 규모 5.8)보다 규모는 작지만, 경주지진 발생 1년 만에 발생했다는 점에서 대규모 지진에 대한 국민 불안 심리를 더욱 증폭시키는 계기가 되었음.
- 이와 같이 건축물 밀도가 높은 도시에서의 지진은 동시다발적 피해를 야기하며, 그 피해는 복구 전까지 지속적이고 연쇄적으로 발생한다는 특징이 있음.
- 특히 지역주민의 기본 생활을 유지하는 데에 필수적인 <u>사회기반시설(Social Overhead Capital, SOC)이 재난으로 인해 가동중지될 경우 해당 시설에서 제공하는 서비스를 필요로 하는 다른 시설의 2차 피해를 야기할 수 있음</u>.
- 실제로 2017년 포항 지진으로 인하여 피해 지역 내 약 800가구가 일시적으로 전력 공급이 중단되고, 상수도관 40여 곳이 파손되었으며 보수를 위해 일부 급수를 중단시켜야 하는 상황이 발생하여 주민들의 불편이 지속되었음.

[그림 1] 경주, 포항지진 당시 사회기반시설 피해 사례

❑ 사회기반시설의 네트워크적 특성으로 인한 피해 진단의 어려움

- 자연 재해에 대한 국민 불안을 잠재우고 공공서비스의 공급 지속성을 확보하기 위해 정부에서는 SOC 관련 예산 투자 방향을 신규 시설 건설에서 유지보수와 안전성측면으로 전환하였으며, 국토교통부는 2017년 영남 지역에 위치한 5,312개 SOC 시설에 대한 내진성능 특별점검을 수행하였음.
- 또한 대한토목학회와 대한건축학회에서는 포항 지진특별조사단을 구성하여 포항 지진으로 피해가 발생한 사회기반시설의 안전 점검을 실시하였음.
- 그 결과 국내에 발생하는 지진의 경우, 일본, 미국 등 국외 강진 지역의 지진 특성과는 달리 진동의 지속 시간이 짧고(2~3초), 진원지 깊이가 깊어(심도11km~16km) 시설물에 구조적 피해를 적게 가져온 것으로 분석되었음.

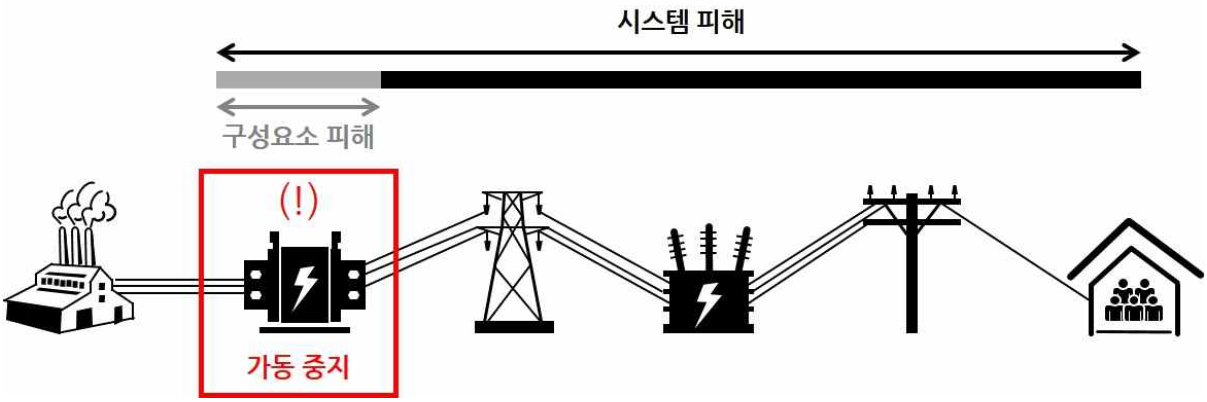
- 그러나 한반도 지진의 발생빈도가 지속적으로 증가하고 있는 상황인 만큼 향후 발생할 수 있는 지진에 대응할 수 있는 기반을 지속적으로 확보해나가야 하며, 현재와 같이 **재난 발생 이후 직접 현장을 방문하여 시설물의 손상을 평가하는 방법은 막대한 시간과 비용의 문제가 발생할 수 있고 사전 대응이 불가능**하다는 한계가 있음.
- 그 예시로 다음 [그림 2]의 네팔 지진 피해 사례를 살펴보면 사망자나 부상자 또는 붕괴된 주택 수의 경우 지진 발생 이후 대략 수주 혹은 수개월이 소요되었으며, SOC시설 피해로 인한 전기, 가스, 수도 등 서비스 공급의 저하는 결국 파악되지 않았음을 알 수 있음.

[그림 2] 2015년 네팔 지진 피해 진단 Timeline

- 이러한 **피해 진단의 지연은 SOC가 광범위한 지역에 분산된 네트워크적 특성을 갖는 데에서 기인**하며, 개별 시설물의 구조적 손상 진단뿐만 아니라 전체 기능의 저하를 예측하는 시스템 차원의 접근이 필요함을 나타냄.
- 특히 **전력, 가스, 상·하수도 시설과 같이 SOC 가운데 선형적인 특성을 가지며, 하나의 시설(예: 발전소, 변전소 등)이 전체 시스템(예: 전력계통)의 부분으로서 역할을 하는 라이프라인시스템(Lifeline System)**에 대한 피해 진단 체계 구축이 시급함.

❑ 라이프라인시스템 내 연쇄피해효과를 고려한 기능저하 예측 도구의 필요

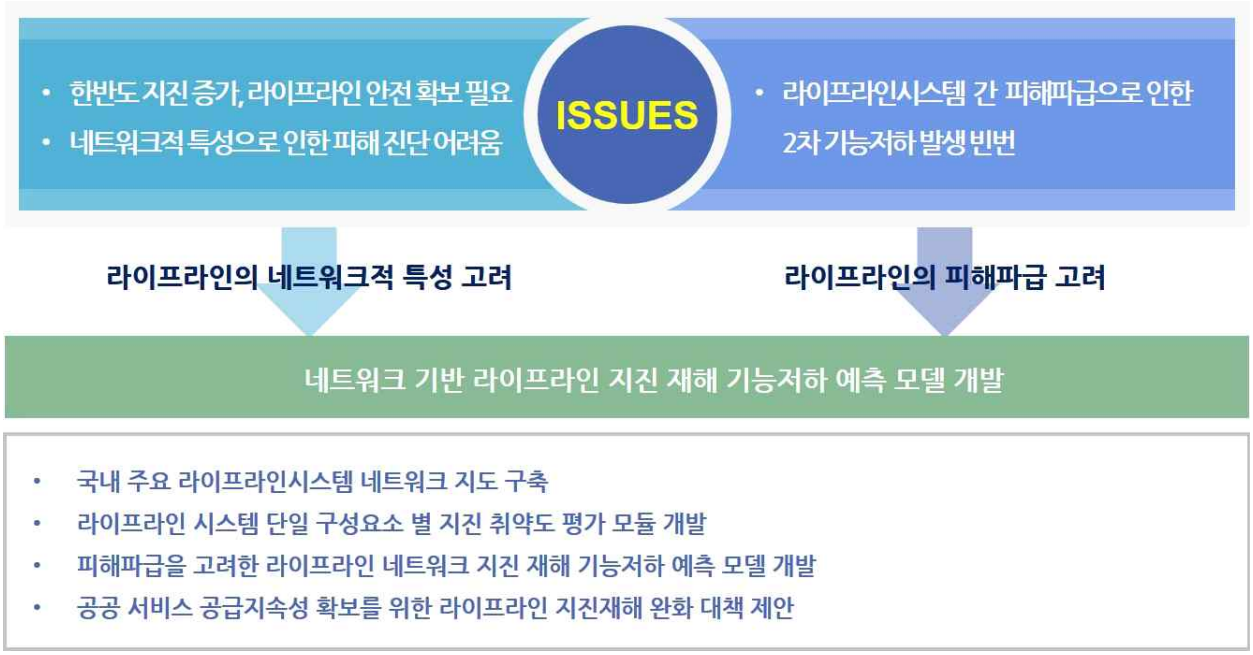
- 라이프라인시스템에 있어 피해 진단이란 단순히 구조물이 얼마나 무너졌는가의 물리적 손상(Physical Damage) 측정이 아닌, **해당 시스템이 본래 의도로 했던 서비스를 제공할 수 있는 능력이 얼마나 감소되었는가의 기능적 저하(Functional Loss)의 측정을 의미함**.
- 이러한 개념을 관련 연구에서는 시스템이 서비스를 제공할 수 있는 능력(Serviceability)으로 표현하고 있으며, 일반적으로 이 값은 연쇄피해효과로 인해 시스템을 구성하는 개별 시설물의 기능저하 평균보다 낮을 것으로 예상하고 있음.



[그림 3] 라이프라인시스템(전력계통) 연쇄 피해의 예시

- 예를 들어, [그림 3]과 같이 전력계통 내 임의의 변전소가 재난으로 인해 가동 중지되는 경우 그로부터 전력을 공급받는 하위 변전소의 가동 중지로 이어지게 되고 결국 최종 소비자에게 전력 공급을 지연시키는 상황이 발생할 수 있음.
- 따라서 개별 구성요소의 피해가 전체 시스템의 피해로 전이되는 것을 방지하기 위해서는 우선적으로 **라이프라인 거점 시설과 그 상호작용을 노드(Node)와 링크(Link)로 표현하는 네트워크 지도를 구축**하고, 재난 상황을 모사하여 현재 어떤 시설에 의해 피해 확산이 진행되고 있는지, 피해 지역에 추가적으로 공급해야할 비상전력이 어느 정도인지, 공공 서비스가 재개되기 위해서는 며칠이 필요한지 등 **최종 수요자 입장에서의 라이프라인 기능저하 예측 도구를 개발해야 함.**
- 특히 예측 도구를 통해 해당 시스템이 제공하고 있는 지역의 서비스 (예: 전기, 수도)의 공급 저하를 예측함으로써 피해 대응을 위한 수급 자재, 인력, 기간 등의 정보를 적시에 제공하여 지역 단위 재난 대응의 선진화를 도모할 필요가 있음.

1-2. 연구개발 목적



[그림 4] 연구개발 목표 및 핵심성과

- 본 연구는 자연 재해에 대한 국민 불안을 잠재우고 공공서비스의 공급 지속성을 확보하기 위한, **"네트워크 기반 라이프라인 지진 재해 기능저하 예측 모델 개발"**연구로, 국내 주요 라이프라인시스템의 위치 정보와 그 상호작용을 노드와 링크로 표현하는 네트워크 지도를 구축하며 공간분석 연구방법을 기반으로 지진 재해 이후 라이프라인 시스템의 기능 저하를 예측하는 모델을 개발하는 것을 최종 목표로 함.
- 구체적으로 연구 1차년도에서는 국가공간정보포털 등에서 제공하는 공간정보 데이터를 토대로 **국내 주요 라이프라인시스템의 네트워크 지도를 구축**하며, 선행연구 고찰을 통해 라이프라인 시스템 **단일 구성요소의 지진 취약도 평가 모듈을 개발**함. 그 후 라이프라인 시스템의 기능 저하를 유발하는 피해 사건 및 사건 간 인과관계를 표현하는 **라이프라인 네트워크의 피해 파급 베이지안 모형을 작성**함.

- 연구 2차년도에서는 1차년도의 개발 성과를 바탕으로 지진 규모별, 진원지 위치별 가상 시나리오에 따른 **지진 발생 직후 라이프라인 네트워크의 강건성 예측 모델을 개발**하고 지진 발생 이전 대비 기능저하정도 및 지역별 최종수요자의 분포를 나타내는 **기능저하 시각화 모듈을 개발**함. 또한 전문가 자문 및 실제 지진 당시 기록된 계측값과의 오차 비교 등을 토대로 **개발된 모델의 검증을 수행**하며, 개발 모델을 활용하여 라이프라인 시스템의 지진재해를 완화하기 위한 **라이프라인 네트워크 회복탄력성 확보 방안**을 제안함.
- 따라서 본 연구를 통해 **1)국내 주요 라이프라인시스템 네트워크 지도, 2)라이프라인 시스템 구성요소 지진 취약도 평가 모듈, 3)라이프라인 시스템 네트워크 지진재해 기능저하 예측 모델, 4)라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책**의 네 가지 핵심성과가 도출될 수 있음.

※ 본 최종보고서 내 주요 용어 정의

- 라이프라인시스템(Lifeline System): 지역사회가 필요로 하는 공공서비스를 제공하는 '생명줄' 역할을 하는 시설로써 사회간접자본시설 가운데 네트워크적인 특성을 갖고 있는 전력, 가스, 통신, 상수도, 하수도시설 등을 포함함.
- 노드(Node): 라이프라인시스템 내 주요 거점시설 (예: 발전소, 변전소)
- 링크(Link): 두 거점시설을 연결하는 보조시설 (예: 송배전선로)
- 서비스제공가능도(Serviceability): 라이프라인 시스템이 본래 의도로 했던 서비스를 제공할 수 있는 능력을 나타내는 값. 본 연구에서는 물리적 손상과 대비되는 지표로써 재난 이전 보통의 상태일 때 100%로 정의됨.
- 피해파급(Failure Propagation): 라이프라인시스템 내 하나의 구성요소의 상태 변이가 다른 구성요소의 상태에 영향을 주는 현상. 네트워크 상단부에 위치한 구성요소일수록 전체 네트워크에 미치는 피해파급효과가 큼.
- 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration): 시설물이 위치한 특정 지반에서 계측된 지진 가속도 시간이력 중 최대 절대값. 일반적으로 중력가속도 g(9.8m/sec^2)로 표시됨.
- 회복탄력성(Resilience): 회복탄력성이란 지역단위의 재난대응을 의미하는 개념으로써, 재해 발생이후 도시가 본래의 상태로 빨리 복구할 수 있는 역량을 나타냄.
- 네트워크 강건성(Robustness): 네트워크 강건성은 회복탄력성의 구성요소 중 하나로 재난과 같은 외부 환경 변화에도 불구하고 본래의 기능을 유지하는 성질을 의미함. 본 연구에는 네트워크 강건성을 지진 직후 손상된 라이프라인 네트워크에서 서비스를 공급받고 있는 최종수요자의 수를 지진 발생 이전 해당 네트워크에서 서비스를 공급받고 있던 최종 수요자로 나눈 값으로 정의함.
- 기능저하(Functional Loss): 라이프라인 시스템의 공급능력을 의미하는 서비스제공가능도가 최종수요로 전달되는 과정에서 다양한 피해파급 과정으로 인하여 현재 최종 수요의 값이 제공 가능한 공급량의 총계보다 작을 때 기능저하가 발생하였다고 판단함.

1-3. 연구개발 범위

❑ 공간적 분석 범위

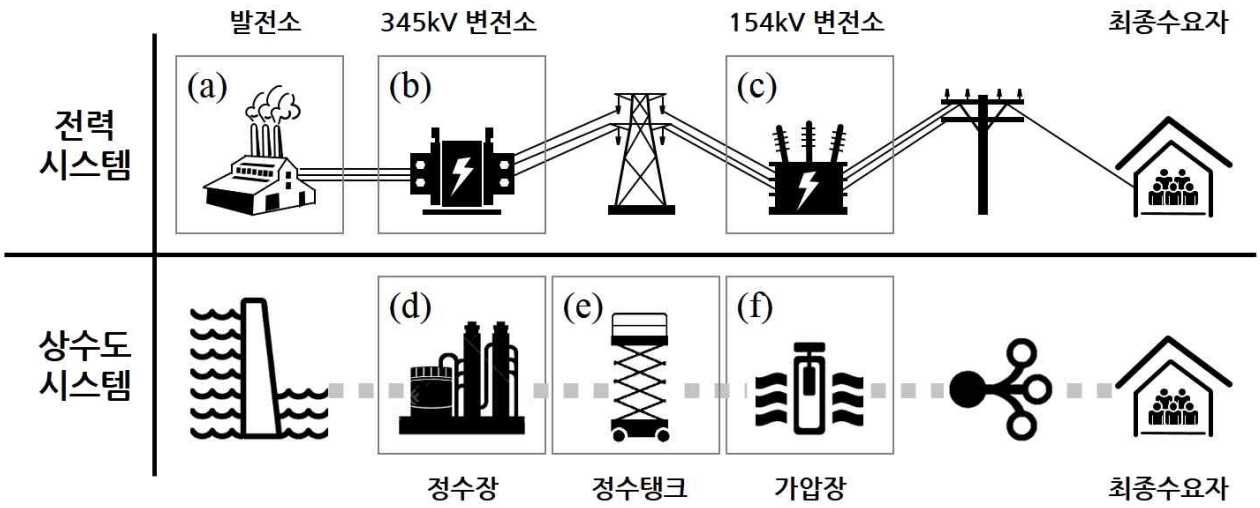
- 본 연구는 2016년 9월 한반도 최대 규모(리히터 규모 5.8)의 지진이 발생한 경주시와 2017년 11월 15일 리히터 규모 5.4의 지진이 발생한 포항시를 포함하는 대구경북지역의 총 23개 구역을 분석대상지역으로 하고 있으며, 그 중 인구밀도가 가장 높은 대구 지역에 대하여 보다 구체적인 분석을 수행함. 분석대상지역 분포 및 상세정보는 다음 [표 1] 및 [그림 5]와 같음.

[표 1] 본 연구의 분석대상지역 정보

분류	지명		면적(km²)	고객호수 (가구)	밀도 (가구/km²)
1	영주시	Yeongju	669	48,678	72.8
2	봉화군	Bonghwa	1,202	16,492	13.7
3	울진군	Uljin	989	25,186	25.5
4	문경시	Mungyeong	912	34,643	38.0
5	예천군	Yecheon	661	22,123	33.5
6	안동시	Andong	1,522	73,714	48.4
7	영양군	Yeongyang	815	8,800	10.8
8	상주시	Sangju	1,255	46,750	37.3
9	의성군	Uiseong	1,175	27,440	23.4
10	청송군	Cheongsong	846	13,460	15.9
11	영덕군	Yeongdeok	741	20,185	27.2
12	김천시	Gimcheon	1,009	62,202	61.6
13	구미시	Gumi	615	168,487	274.0
14	군위군	Gunwi	614	12,428	20.2
15	영천시	Yeongcheon	919	47,509	51.7
16	포항시	Pohang	1,130	212,095	187.7
17	성주군	Seongju	616	21,877	35.5
18	칠곡군	Chilgok	451	53,695	119.1
19	**대구광역시**	**Daegu**	**884**	**994,220**	**1,125.0**
20	경산시	Gyeongsan	412	107,821	261.7
21	경주시	Gyeongju	1,325	113,798	85.9
22	고령군	Goryeong	384	16,215	42.2
23	청도군	Cheongdo	694	21,722	31.3
총계			19,840	2,169,540	-

[그림 5] 본 연구의 분석대상지역 분포

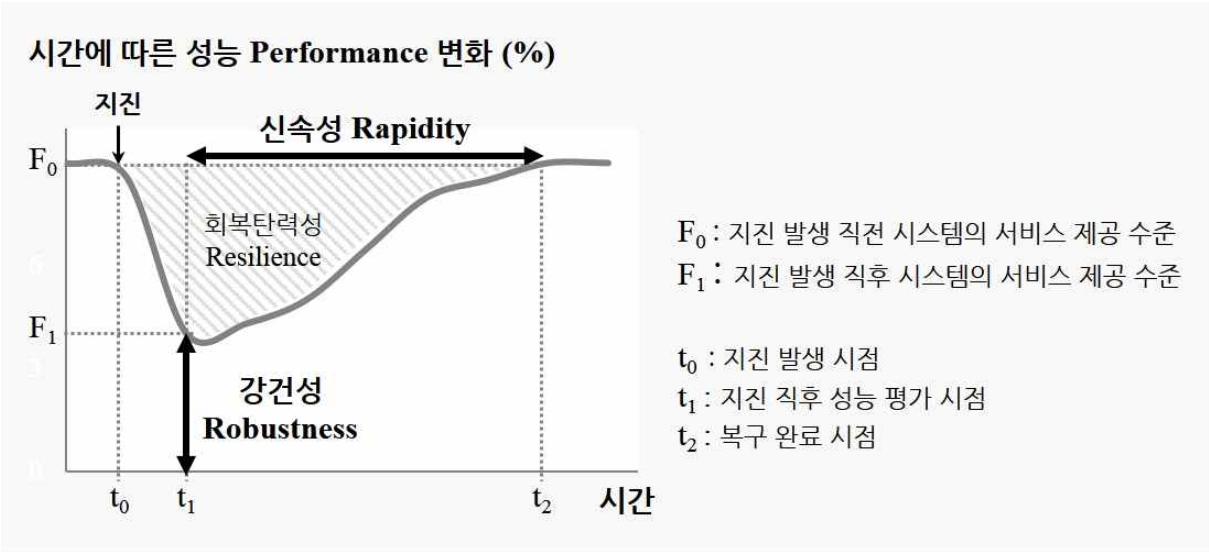
- 또한 본 연구에서 라이프라인 시스템이란 전력 및 상수도 네트워크로 한정되며, 각 네트워크 구성 요소 중 주요 시설물에 해당하는 **발전소, 변전소, 정수장, 저수탱크, 가압장([그림 6]의 (a)~(f))의 지진 피해로 인한 최종수요자([그림 6]의 (g))의 서비스 공급 중단 확률을 예측**함.
- 단, 송·배전선로나 송·배수관로에서의 피해는 없는 것으로 가정함.



[그림 6] 본 연구의 분석대상 라이프라인시스템 및 구성요소

❑ 시간적 분석 범위

- 전력 및 상수도와 같은 공공서비스를 제공하는 라이프라인 시스템은 일반 건축물과 달리 지진 발생 직후 수 분 이내에 지진 데이터를 수신하고, 이에 따른 피해 및 변위를 예측하여 시설물 작동에 대한 의사결정을 하는 것이 요구됨.
- 예를 들어 국내에 위치한 원자력 발전소의 경우, 지진으로 인한 최대지반가속도가 0.1g (g= 중력가속도, 9.8m/sec²)를 초과하면 자동으로 운전을 정지하도록 설계되었으며, 최대지반가속도 0.2g 이상이면 안전점검을 수행하도록 규제하고 있음.
- 따라서 본 연구는 지진 발생 직전부터 지진 발생 직후까지를 시간적 분석 범위([그림 7]의 t_0부터 t_1구간)로 하여, **지진 직후의 서비스 제공 수준(강건성, Robustness, %)을 예측**함.
- 추가적으로 본 연구의 성과물 중 하나인 라이프라인 시스템 네트워크 지진재해 기능저하 예측 모델을 바탕으로 **지진 직후 성능평가 시점부터 복구완료시점까지의 기간(신속성, Rapidity, 일)을 단축하는 라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책을 제시**함.



[그림 7] 본 연구의 시간적 분석 범위

❑ 기타 분석 범위

- 재난 요소 : 지진 (지진해일 또는 산사태 등은 동반하지 않음).
- 시설물 피해 유형 : 구조적 피해 (파괴 및 붕괴), 기능적 피해 (작동 정지).
- 최종수요자 피해 유형 : 정전 및 단수.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

2-1. 국내 관련 연구 및 산업 동향

- 최근 건물 붕괴, 화재 등 재해로 인한 대규모 인명 피해가 많이 발생한 우리나라의 경우 [표 2]에서와 같이 중국과 더불어 안전 서비스 관련 시장의 성장세가 두드러지며 안전에 대한 국민의 관심과 욕구가 높은 편임.

[표 2] 안전 서비스 관련 시장 규모 (The Freedonia Group, 2014)

구분	2011 (억 달러)	2016 (억 달러)	2021 (억 달러)	연평균 증감률 (%)
세계	1,708	2,435	3,370	7.0
미국	497	645	810	5.0
서유럽	393	473	563	3.7
중국	49	99	180	13.9
일본	97	123	148	4.3
한국	**35**	**54**	**79**	**8.5**

- 또한 2016년과 2017년 잇따른 지진 발생 이후, 라이프라인시스템의 안전성 확보에 대한 사회적 관심이 증가함에 따라 최근 다양한 연구기관에서 지진 피해 예측과 관련한 다수의 R&D 과제들이 수행되었음.
- 그러나 아직까지는 관련 기술 기반이 취약하여 원천기술 대부분을 미국이나 일본과 같은 방재 선진국에 의존하고 있는 전형적인 추격 시장이며, **기반시설의 안전 확보를 위한 재난 예측 및 대응분야의 공통 플랫폼 기술 역시 미비**한 상황임.
- 이에 국내 라이프라인시스템의 피해 진단 연구는 주로 구조해석을 통해 시설물 내진설계 기준을 재정립하거나 재해 발생 가능성이 높은 시설물에 한해 추가적인 내진보강 기술을 적용하는 등 구조적 대응의 형식으로 수행되고 있음.
- [표 3]은 국가과학기술지식정보서비스 NTIS에서 본 연구와 유사한 국가연구개발과제(유사도 30이상)에 대하여 중복성 검토를 수행한 결과로, 이 중 한국연구재단의 "철도시설물 자연재해 취약성 평가기술 개발" 및 "지진재해대비 물 공급 시스템 신뢰성 강화 기술 개발"은 자연재해에 대한 기반시설 위험도를 평가한다는 점에서 본 연구와 목표가 유사하나 **라이프라인시스템 중 철도, 수도 등 단일 시스템에 대해서만 다루고 있다는 점에서 본 연구와 분석범위가 상이함**.
- 또한 국민안저처의 "도시기반 인프라 네트워크의 지진취약도 함수 개발"과제는 지역 내 라이프라인 전반의 지진 대응을 지원한다는 점에서 본 연구와 추진 배경이 유사하나 인구, 주택, 중소기업 비율 등 **지역적 특성만을 주요 취약도 평가요소로써 판단**하고 있어 지역 특성뿐만 아니라 라이프라인시스템의 공공 서비스 저하를 판단하는 본 연구와 대조됨.
- 본 연구는 **풍수해와 달리 이력 데이터가 미비한 국내 지진 재해 통계 수집의 기초를 마련**한다는 점에서 "풍수해 피해예측지도 작성기술 개발 및 지도 작성"과제와도 차별화되므로, 현재 본 연구에 부합되는 선행연구는 부재한 상황임.

- 또한 확률변수를 기반으로 재난 강도별 손실을 정량적으로 제시하는 몇몇 연구에 있어서도 아직까지는 표본 시설의 부재 취약도만을 고려하거나, 보수비용과 같은 경제적 손실에만 초점을 맞추고 있어 종합적인 네트워크 차원 피해 진단으로의 확장에는 어려움이 있음.
- 정리하자면, 국내 SOC 전반의 재난대응을 목적으로 하는 연구의 경우에도 재난을 실시간 모니터링하고 개별시설물의 재해 위험등급을 산정하는 기술은 확보하고 있는 반면, 재해 지역에 대한 **총괄적인 피해를 진단하고 공공서비스 저하를 예측하여 재난 대응 의사결정을 지원하는 시스템 관련 연구는 부족**한 상황임.

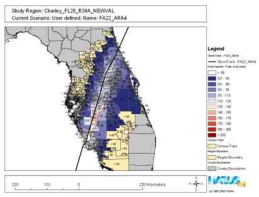
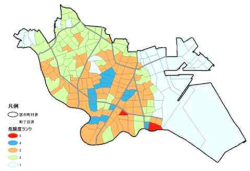
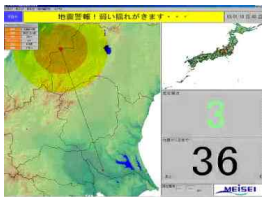
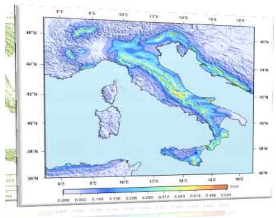
[표 3] 선행 국가연구개발과제 현황

주관 연구기관	연구명	연구 관리기관	연도	주요내용
서울시립 대학교	도시기반 인프라 네트워크의 지진 취약도함수 개발	국민안전처	2012~ 2015	라이프라인 시스템의 지진피해를 수리비용, 복구비용, 인구밀도 등 사회 경제적 관점의 손실로 평가하는 방안 제시
한국 수자원 공사	풍수해 피해예측지도 작성기술 개발 및 지도 작성	국민 안전처	2015~ 2020	범람 해석기반 호우피해 예측지도 작성 및 강풍 피해 예측지도 작성
한국교통 대학교	철도시설물의 자연재해 취약성 평가 기술 개발	한국 연구재단	2016~ 2019	태풍 시뮬레이션 모델 및 인공지진 작성을 통하여 철도시설물 별 취약도 분석을 수행하고, 방재 대책 수립을 지원함
부경대학교	원전 지진대응 역량강화를 위한 지진 단층특성 분석 및 내진성능향상 원천 기술개발	한국에너지 기술평가원	2017~ 2022	원전부지 주변 활성단층 추적 및 원전시스템의 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 핵심 필요기술 개발
한국시설 안전공단	도로망의 지진복원력 평가를 통한 노후 도로시설의 내진성능관리 의사결정지원 기술 개발 및 시범적용	국토교통 과학기술 진흥원	2018~ 2021	주요 도로시설(교량, 터널, 사면, 옹벽)의 지진취약도 함수를 개발하고, 노후 도로시설에 대하여 내진성능평가 및 보강기술 개발
수원 대학교	지진재해대비 물 공급 시스템 신뢰성 강화 기술 개발	한국 연구재단	2018~ 2021	지진재해 시 상수관망 수리해석 기법 개발 및 지상(배수지, 가압장) 및 지중구조물(관로) 누수, 파손 상세 수리해석 기술 개발

2-2. 국외 관련 연구 및 산업 동향

- 전 세계 안전 서비스 관련 시장은 2021년까지 연평균 7%씩 성장하여 3,370억 달러 규모에 이를 것으로 예상되며, 모바일, 소셜 미디어, CCTV, 로봇, GIS 등의 다양한 ICT 기술을 활용한 재난대응시스템에 관심이 집중되고 있음.
- 예를 들어, 관련 분야 최고기술보유국인 미국은 재난의 위험을 미리 파악하고 그 피해 범위를 줄이기 위해 연방관리청(FEMA)을 중심으로 항공우주국(NASA) 등 유관기관에서 수집된 재난 정보를 분석하고 재난의 잠재적 영향력을 시각화하여 지역 주민들에게 모바일 경보 앱을 통해 실시간으로 전달하는 시스템을 개발하고 있음.
- 대표적으로는 지진, 홍수 등 지역 단위 재해 예측 진단 도구인 HAZUS 시스템이 있으며 라이프라인시스템을 급수, 가스, 전력, 통신 등으로 분류하고 인구조사국 Census에서 제공하는 관련 데이터와 연계하여 확률론적 취약도함수를 기반으로 재해 사전영향평가를 수행하고 있음.
- 수차례의 대규모 자연재해로 관련 시스템이 잘 정비되어있는 일본의 경우 2007년부터 기상청과 연계한 지진 속보설비를 구축하고 있으며, 국토교통성의 Hazard Map Portal을 통해 도내 도시계획구간 단위지역의 지진, 화재위험도를 실시간으로 공표하고 있음.
- 또한 해당 Portal에서 제공되는 재해 위험도를 하위 라이프라인시스템 분석 도구에 제공하여 특정 재난에 따른 의사결정을 지원하고 있는데, 지진으로 인한 흔들림을 예측하여 철도 운행 정지를 경고하는 Nowcast등이 이러한 하위 분석 도구에 해당됨.
- 이와 같이 **국외에서는 실제로 발생하였던 재난사례를 기반으로 통계적 모델을 작성하고 다양한 시뮬레이션 기술과 연계하여 재해의 지역단위 파급효과를 예측**하고 있어 비교적 구체적이고 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다는 장점이 있음.
- 하지만 **국내의 경우와 같이 과거 재난 이력에 대한 통계자료가 미비한 경우**에는 적용이 어렵고 라이프라인시스템의 **GIS기반 네트워크 지도 구축, 재해 취약도 곡선에 기반을 둔 예측 모델 개발 등 기초연구가 우선적으로 수행되어야 한다**는 한계가 있음.

[표 4] 라이프라인 피해 진단 관련 국외 상용 프로그램

프로그램명	개발 국가	주요 기능	관련 사진
HAZUS	미국	▪ GIS기반의 재해 사전 영향평가 ▪ Census 제공 자산 DB와 연계한 피해 손실 규모 추정 ▪ 건물취약도함수 기반 확률론적 피해 평가	
Hazard Map Portal	일본	▪ 도시계획구간 단위 내 지역의 지진, 화재위험도를 상대적으로 평가하여 시각적으로 표시 ▪ 특정 재난 시나리오에 따른 위험 영향 범위 분석 가능	
NowCast	일본	▪ 긴급 지진 속보 설비, 추정진도 산출, 흔들림 예측 ▪ 특정범위 이상의 지진 데이터가 감지되는 경우 철도 운행 정지 경고	
OpenQuake	이탈리아 및 유럽 국가	▪ 최대지반가속도를 기준으로 지역단위 지진 피해 예측 ▪ 인명피해, 경제손실 등 사회적 영향을 고려한 통합 위험도 제안 ▪ 오픈소스 소프트웨어	

2-3. 연구 제안의 기술개발성숙도

- 국내외 관련 연구 동향 분석을 토대로, 본 연구 제안을 국토교통 R&D 중장기 전략(2014~2023)기준으로 분류하면 다음과 같음.

  - 대분야: 건설기술
  - 중분야: 재난·재해 대비 시설물 유지관리 및 건설 안전 기술
  - 소분야: 시설물 상태진단 및 예측용 소프트웨어 개발

- 한편 본 연구 제안과 관련한 국내 기술개발성숙도를 살펴보았을 때 현재는 **라이프라인 시스템의 네트워크 특성을 고려한 기능저하의 기술적 개념을 정의**하고 제안하는 TRL 2단계이며, 향후 본 연구가 성공적으로 수행되어 라이프라인 재해 기능저하 예측 모델이 개발되는 경우 **특정 재난 시나리오를 대상으로 기초 기술 성능을 구현**하는 TRL 4단계로 성숙될 것으로 예상됨.

[표 5] 본 연구 제안의 착수 전과 종료 후 예상되는 기술개발성숙도

구분		연구착수	연구종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	□	□	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	■	□	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	□	□	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	□	■	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	□	□	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	□	□	TRL 6 유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	□	□	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	□	□	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	□	□	TRL 9 현장적용/사업화 단계

제3장. 연구수행내용 및 성과

3-1. 연차별 연구개발 목표 및 내용

연차	연구 목표		주요연구내용
1차 연도 (2017)	[A]	국내 주요 라이프라인 시스템 네트워크 지도 구축	[A1] 연구 분석대상지역 선정 [A2] 라이프라인시스템 분석범위 선정 [A3] 라이프라인시스템의 공간적 특성 (예: 위도, 경도), 물리적 특성 (예: 구조, 재료), 기능적 특성(예: 제공 서비스, Input, Output) DB 구축 [A4] 라이프라인시스템 네트워크 지도 구축
	[B]	라이프라인 시스템 단일 구성요소 별 지진 취약도 평가 모듈 개발	[B1] 국내외 지진동감쇠식 및 지진 취약도 평가 관련 문헌조사 [B2] 임의의 지진에 대해 진앙거리를 기반으로 최대지반가속도를 추정하는 함수 작성 [B3] 라이프라인시스템의 단일 구성요소 특성을 고려하여 최대지반가속도에 따른 지진취약도 곡선 작성
	[C]	피해파급을 고려한 라이프라인 네트워크 지진 재해 기능저하 예측 모델 개발	[C1] 라이프라인 구성요소 서비스제공가능도, 네트워크 강건성, 기능저하 개념 정립 [C2] 라이프라인 기능저하를 유발하는 피해 사건 분류 및 기술 [C3] 라이프라인 기능저하 유발 사건 간 인과관계를 고려한 피해파급의 베이지안 모형 작성
2차 연도 (2018)			[C4] 라이프라인 시스템 단일 구성요소 지진 취약도 평가 모듈과 피해파급의 베이지안 모형 연동 [C5] 지진 직후 서비스 공급이 가능한 최종수요자를 나타내는 라이프라인 네트워크 강건성 평가 모듈 개발 [C6] 라이프라인 기능저하정도 및 최종수요자 분포 시각화 모듈 개발 [C7] 개발모델에 대한 정성적, 정량적 검증방안 제시 및 보완
	[D]	라이프라인 시스템의 지진재해 완화 대책 제안	[D1] 공통원인피해의 발생확률을 저감하여 네트워크 강건성을 증진시키는 방안 제안 [D2] 피해파급의 발생확률을 저감하여 네트워크 강건성을 증진시키는 방안 제안 [D3] 각 완화대책에 대한 효과성 및 기능회복수준 비교 분석

3-2. 연구 수행 방법 및 절차

- 본 연구는 지역 단위의 재난 관리를 지원하기 위해 **지진 피해 지역의 도시공간정보를 수집하고 이를 통계적으로 가공, 분석하여 새로운 정보를 창출하는 공간분석(Spatial Analysis) 연구방법을 활용함**.
- 이때 공간분석 연구방법은 일반적으로 1)분석 목표의 정의, 2)자료의 선택 및 수집, 3)자료의 통계적 분석, 4)통계적 분석 결과의 가시화, 5)시사점 도출 및 검증과 같은 다섯 단계를 따르며(Anselin et al., 2006), 이를 본 연구에 적용한 구체적인 연구 절차는 다음과 같음.

1) 분석 목표의 정의

- 본 연구의 **분석목표는 국내 주요 라이프라인 시스템 네트워크 지도를 구축하고 이를 기반으로 지진으로 인한 라이프라인 시스템의 기능저하를 예측하는 것**임.

2) 자료의 선택 및 수집

- 본 연구의 **분석대상지역은 대구 및 경상북도 내 23개 지역**이며, **분석대상 라이프라인 시스템은 해당 지역에 서비스를 제공하는 전력 및 상수도 네트워크**임.

- 또한 본 연구는 분석 목표를 달성하기 위해 필요한 다양한 자료를 취득하고 그 속성 정보를 통일하기 위해 **라이프라인 시스템 특성 데이터베이스[질적성과 1-1]**를 구축함.

3) 자료의 통계적 분석

- 본 연구는 우선적으로 관련 선행 연구 고찰을 통해 임의의 규모를 갖는 지진에 대하여 지진 계측기가 설치되어있지 않은 구조물에서도 진앙거리를 기반으로 지진동을 추정 가능하게 하는 **지진 규모별 최대지반가속도 감쇠함수[질적성과 2-1]**를 개발함.

- 또한 라이프라인 시스템의 구성요소별 구조적/기능적 특징에 따라 최대지반가속도에 따른 1차 물리적 손상 발생 확률을 예측하는 **라이프라인 단일 구성요소의 손실예측함수[질적성과 2-2]**를 개발함.

- 그 다음 앞선 과정을 통해 얻어지는 단일 구성요소의 지진취약도를 전체 네트워크 수준으로 확장하기 위해 라이프라인시스템에서 기능저하를 유발하는 사건을 기준에 따라 분류하고 각 사건 간 인과관계를 표현하는 **라이프라인 네트워크 피해파급의 베이지안(Bayesian) 모형 [질적성과 3-1]**을 작성함.

- 이를 바탕으로 라이프라인 시스템 구성요소 지진 취약도 평가 모듈과 피해파급의 베이지안 모형을 연동하여 지진발생 이전에 라이프라인 네트워크에서 서비스를 공급 받았던 최종 수요자 대비 지진 발생 직후의 최종 수요자의 비율을 나타내는 **라이프라인 네트워크 강건성 평가모듈[질적성과 3-2]**을 개발함.

4) 통계적 분석 결과의 가시화

- 공간분석의 결과는 해석의 편의를 위해 지도나 그래프 형태로 제시될 필요가 있으며, 이를 위해 본 연구에서는 GIS 라이브러리 및 복합 시뮬레이션 기술을 제공하는 Anylogic 소프트웨어를 이용하여 **GIS 맵핑 네트워크 지도[질적성과 1-2]**를 작성함.

- 또한 재난 이전 보통의 상태에서의 서비스 공급량을 100%로 기준한 기능저하정도 및 지역별 현재 최종수요자의 서비스 공급 분포를 나타내는 **기능저하 시각화 모듈[질적성과 3-3]**을 개발함.

5) 시사점 도출 및 검증

- 본 연구는 각 단계별 세부 성과에 대하여 관련 분야 전문가를 대상으로 적정성 평가를 수행하거나, 모델을 통한 예측 값과 실제 지진 당시 계측된 값을 비교하여 오차율 검정을 수행하여 **개발 모델의 검증방안[질적성과 3-4]**을 제안함.

- 또한 최종적으로 상기 연구 성과를 바탕으로 지진 직후부터 복구완료시점까지의 기간을 단축하여 라이프라인 시스템의 지진재해를 완화하기 위하여 **개발 모델을 활용한 라이프라인 네트워크 회복탄력성 확보 방안[질적성과 4-1]**을 제안함.

3-3. 세부 연구 수행 내용

가. 국내 주요 라이프라인 가. 국내 주요 라이프라인 시스템 네트워크 지도

❑ 라이프라인시스템 특성 데이터베이스

1) 개발 개요

- 정부기관 간 업무 공유를 통한 가치 창출을 목표로 하는 정부 3.0의 정책 기조에 따라 국토교통부에서는 지난 2016년 산재된 공간정보를 한 곳에서, 한 번에, 누구나 쉽게 활용할 수 있도록 국가공간정보포털을 구축하고 공공과 민간에서 활용성이 높은 공간정보(예:GIS 건물 정보, 토지이용정보 등)의 파일 데이터를 개방하고 있음.
- 그러나 **라이프라인시스템의 경우 전력거래소의 전력통계정보시스템, 환경부의 국가상수도정보시스템 등 개별 운영기관별로 서로 다른 데이터를 제공**하고 있어 본 연구에서 활용 가능한 관련 데이터베이스는 없는 상황임.
- 따라서 우선적으로 본 연구의 최종 목표를 달성하기 위해 필요한 라이프라인시스템의 공간적, 물리적, 기능적 특성 관련 다양한 데이터를 수집하고, 각 데이터 간 원활한 상호연동을 도모하기 위해 데이터 속성 정보를 통일한 라이프라인시스템 특성 데이터베이스를 구축함.

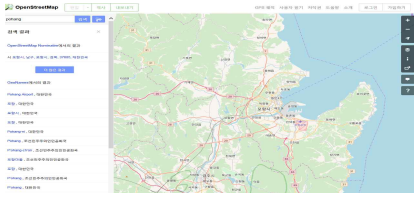
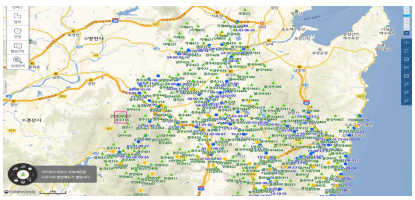
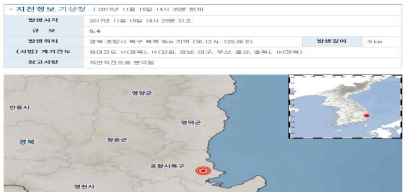
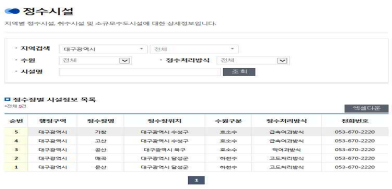
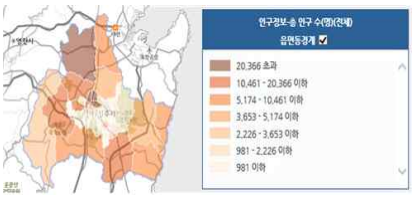
2) 개발 결과

- 본 연구는 **공공 데이터의 적극적인 활용을 통한 부가가치 창출과 같은 정부의 정책적 노력에 동참하기 위해 국내외에서 오픈소스로 제공하는 공간 정보를 적극 활용**함.
- 예를 들어, 본 연구의 기초자료가 되는 GIS 지도는 세계지도의 공공재화를 목적으로 영국의 비영리기구 Open Street Map Foundation에서 개발한 참여형 무료지도 Open Street Map을 활용함.
- 이때 Open Street Map에서 얻을 수 없는 행정구역별 토지특성이나 국토변화정보, 지반침하정보 등 보다 상세한 지역정보는 국토교통부의 국토지반정보 통합 DB센터 및 국토지리정보원의 On-Map을 활용하였음.
- 또한 국토지리정보원의 On-Map에서는 행정구역별 인구정보를 제공하고 있기 때문에 본 연구에서는 이를 활용하여 라이프라인 주요 거점시설 별 수요 분포를 보다 종합적으로 고려함.
- 추가적으로 본 연구에서 활용하는 데이터 항목은 **기본 GIS 지도 정보, 상세 지역 정보, 지진 이력정보, 전력 네트워크 정보, 상수도 네트워크 정보, 최종 수요자 정보**로 분류됨.
- 이때 라이프라인 시스템 거점시설 간 관계에 대한 정보인 위상(topology) 정보는 아래 식과 같이 네트워크 각 노드 간 연결을 행렬로 표현하는 인접행렬(adjacency matrix)로 표현되며, 연결 경로 간 거리는 Dijkstra의 최단경로 알고리즘(Dijkstra, E. W., 1959)을 따름.

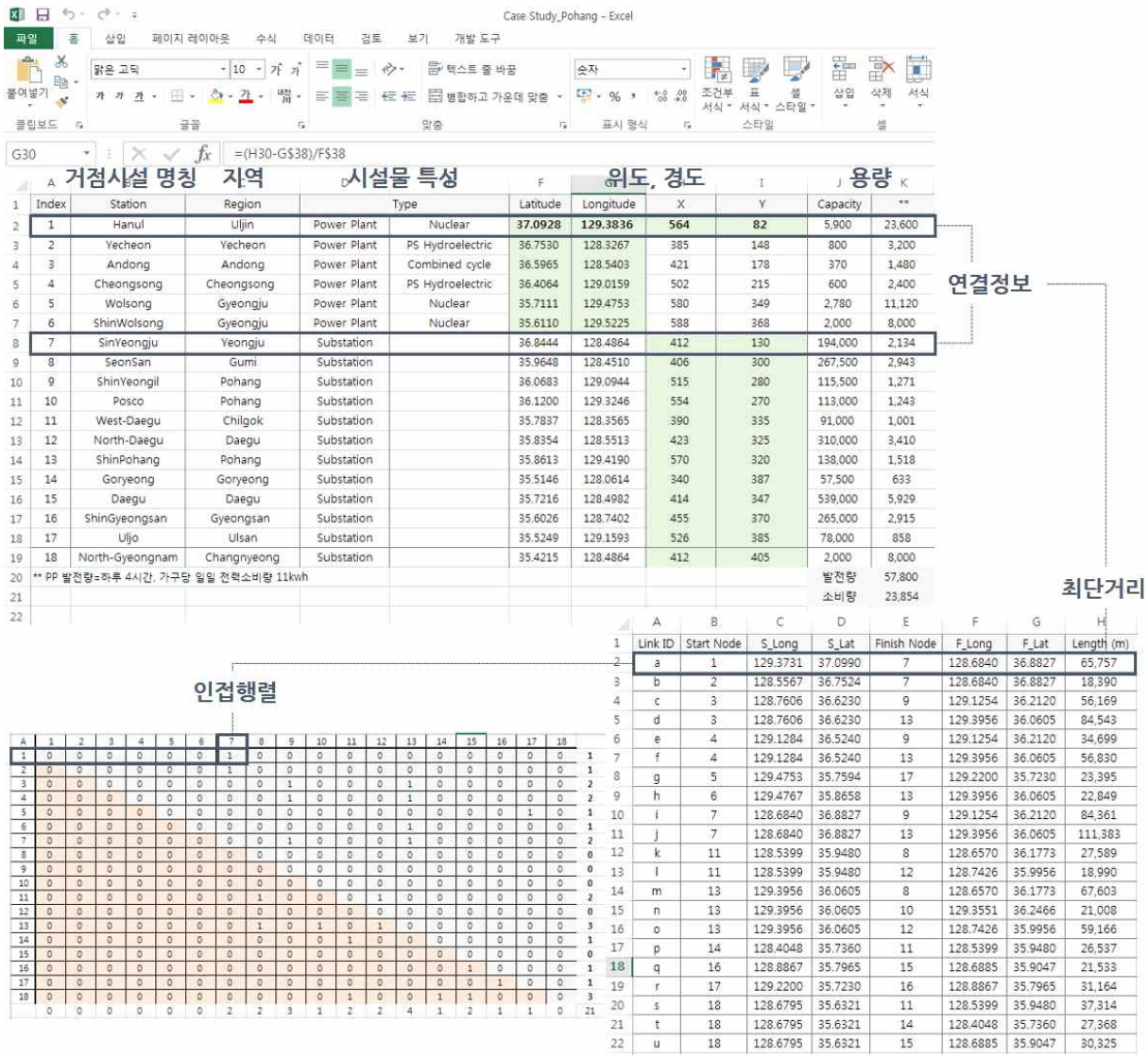
$$A = \begin{pmatrix} a_{11} \cdots a_{1n} \\ \vdots \ a_{ij} \ \vdots \\ a_{n1} \cdots a_{nn} \end{pmatrix} \qquad a_{ij} = \begin{cases} 1 \ (\text{if } i \text{ and } j \text{ are connected} \\ 0 \ (\text{ohterwise}) \end{cases} \qquad \text{(식 1)}$$

- 본 연구에서 활용하는 데이터 항목의 상세 내용은 [표 6]과 같으며, 해당 출처를 통해 얻을 수 없는 항목은 구글 지도, 관련 논문 및 분석 보고서 등을 참고하였음.

[표 6] 본 연구에서 활용하는 데이터 항목

분류	상세 내용	출처
기본 GIS 지역정보	▪ 지역별 Shape File ▪ 건물정보 ▪ 토지이용정보 ▪ 철도 및 도로정보 ▪ 상수로정보	Open Street Map(OSM) 
상세 지역정보	▪ 행정구역별 토지특성 ▪ 지반 정보 ▪ 국토변화정보	국토지리정보원 On-Map  국토지반정보 통합DB센터
지진이력정보	▪ 지진 발생시간 ▪ 진앙지 위도, 경도 ▪ 지진 규모 ▪ 진원깊이 ▪ 지진 관측소 위치, 기록	기상청 
전력 네트워크 정보	▪ 발전소 위치, 발전용량 ▪ 변전소 위치, 고객호수 ▪ 전력계통 간 연결정보	전력통계정보시스템
상수도 네트워크 정보	▪ 정수장 위치, 시설용량 ▪ 저수탱크 위치, 시설용량 ▪ 가압장 위치, 시설용량 ▪ 상수도계통 간 연결정보 ▪ 전력공급계통 연결정보	국가상수도정보시스템 
최종 수요자 정보	▪ 읍, 면, 동 단위 인구 분포 ▪ 서비스 수요 가구 수	국토지리정보원 On-Map 

- 최종적으로 본 연구는 Excel 2013 프로그램을 활용하여 라이프라인시스템 특성 데이터베이스를 개발하였으며, 이 중 분석대상지역 내 전력 네트워크의 거점시설 명칭, 특성, 위치, 용량 및 연결정보에 대한 데이터베이스 구축 예시는 [그림 8]과 같음.



Index	Station	Region	Type		Latitude	Longitude	X	Y	Capacity	**
1	Hanul	Uljin	Power Plant	Nuclear	37.0928	129.3836	564	82	5,900	23,600
2	Yecheon	Yecheon	Power Plant	PS Hydroelectric	36.7530	128.3267	385	148	800	3,200
3	Andong	Andong	Power Plant	Combined cycle	36.5965	128.5403	421	178	370	1,480
4	Cheongsong	Cheongsong	Power Plant	PS Hydroelectric	36.4064	129.0159	502	215	600	2,400
5	Wolsong	Gyeongju	Power Plant	Nuclear	35.7111	129.4753	580	349	2,780	11,120
6	ShinWolsong	Gyeongju	Power Plant	Nuclear	35.6110	129.5225	588	368	2,000	8,000
7	SinYeongju	Yeongju	Substation		36.8444	128.4864	412	130	194,000	2,134
8	SeonSan	Gumi	Substation		35.9648	128.4510	406	300	267,500	2,943
9	ShinYeongil	Pohang	Substation		36.0683	129.0944	515	280	115,500	1,271
10	Posco	Pohang	Substation		36.1200	129.3246	554	270	113,000	1,243
11	West-Daegu	Chilgok	Substation		35.7837	128.3565	390	335	91,000	1,001
12	North-Daegu	Daegu	Substation		35.8354	128.5513	423	325	310,000	3,410
13	ShinPohang	Pohang	Substation		35.8613	129.4190	570	320	138,000	1,518
14	Goryeong	Goryeong	Substation		35.5146	128.0614	340	387	57,500	633
15	Daegu	Daegu	Substation		35.7216	128.4982	414	347	539,000	5,929
16	ShinGyeongsan	Gyeongsan	Substation		35.6026	128.7402	455	370	265,000	2,915
17	Uljo	Ulsan	Substation		35.5249	129.1593	526	385	78,000	858
18	North-Gyeongnam	Changnyeong	Substation		35.4215	128.4864	412	405	2,000	8,000
** PP 발전량=하루 4시간, 가구당 일일 전력소비량 11kwh									발전량	57,800
									소비량	23,854

Link ID	Start Node	S_Long	S_Lat	Finish Node	F_Long	F_Lat	Length (m)
a	1	129.3731	37.0990	7	128.6840	36.8827	65,757
b	2	128.5567	36.7524	7	128.6840	36.8827	18,390
c	3	128.7606	36.6230	9	129.1254	36.2120	56,169
d	3	128.7606	36.6230	13	129.3956	36.0605	84,543
e	4	129.1284	36.5240	9	129.1254	36.2120	34,699
f	4	129.1284	36.5240	13	129.3956	36.0605	56,830
g	5	129.4753	35.7594	17	129.2200	35.7230	23,395
h	6	129.4767	35.8658	13	129.3956	36.0605	22,849
i	7	128.6840	36.8827	9	129.1254	36.2120	84,361
j	7	128.6840	36.8827	13	129.3956	36.0605	111,383
k	11	128.5399	35.9480	8	128.6570	36.1773	27,589
l	11	128.5399	35.9480	12	128.7426	35.9956	18,990
m	13	129.3956	36.0605	8	128.6570	36.1773	67,603
n	13	129.3956	36.0605	10	129.3551	36.2466	21,008
o	13	129.3956	36.0605	12	128.7426	35.9956	59,166
p	14	128.4048	35.7360	11	128.5399	35.9480	26,537
q	16	128.8867	35.7965	15	128.6885	35.9047	21,533
r	17	129.2200	35.7230	16	128.8867	35.7965	31,164
s	18	128.6795	35.6321	11	128.5399	35.9480	37,314
t	18	128.6795	35.6321	14	128.4048	35.7360	27,368
u	18	128.6795	35.6321	15	128.6885	35.9047	30,325

A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	3
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	3
	0	0	0	0	0	0	2	2	3	1	2	2	4	1	2	1	1	0	21

[그림 8] 라이프라인시스템 특성 데이터베이스 예시 : 전력네트워크

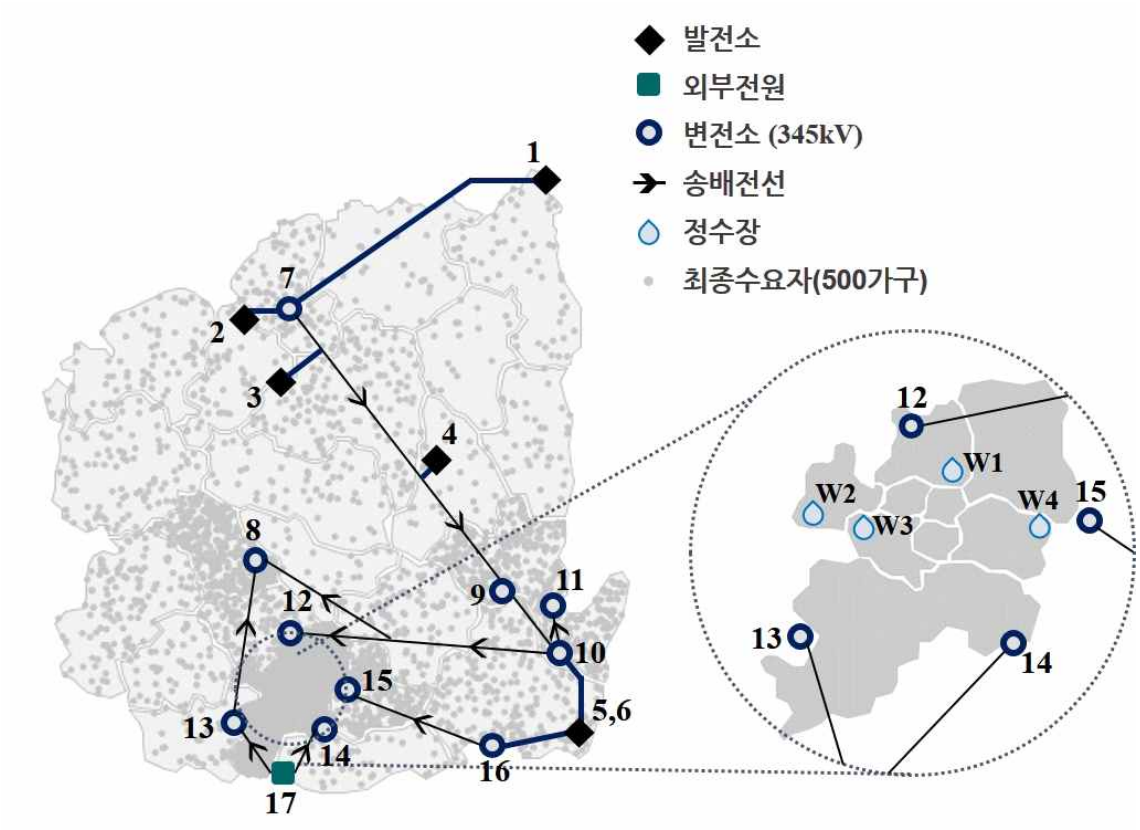
❑ GIS 맵핑 네트워크 지도

1) 개발 개요

- 라이프라인시스템의 경우 개별 구성요소의 위치, 기능, 연결성 등의 특징에 따라 손상의 발생 양상이 다르기 때문에 대표적인 특성 모델로써 일반화 시키는 어렵고, 처음부터 연구대상 지역을 선정하고 분석하고자하는 라이프라인 시스템의 네트워크를 구성할 필요가 있음.
- 이에 본 연구는 앞서 구축한 **국내 대구경북 지역의 라이프라인시스템 (전력 및 상수도) 특성 데이터베이스를 기반**으로 발전소, 변전소, 정수장, 가압장을 거점시설(Node)로, 이들을 물리적으로 연결하는 송배전선로 및 송배수관로를 연결경로(Link) 하는 **라이프라인 네트워크 지도를 개발**함.

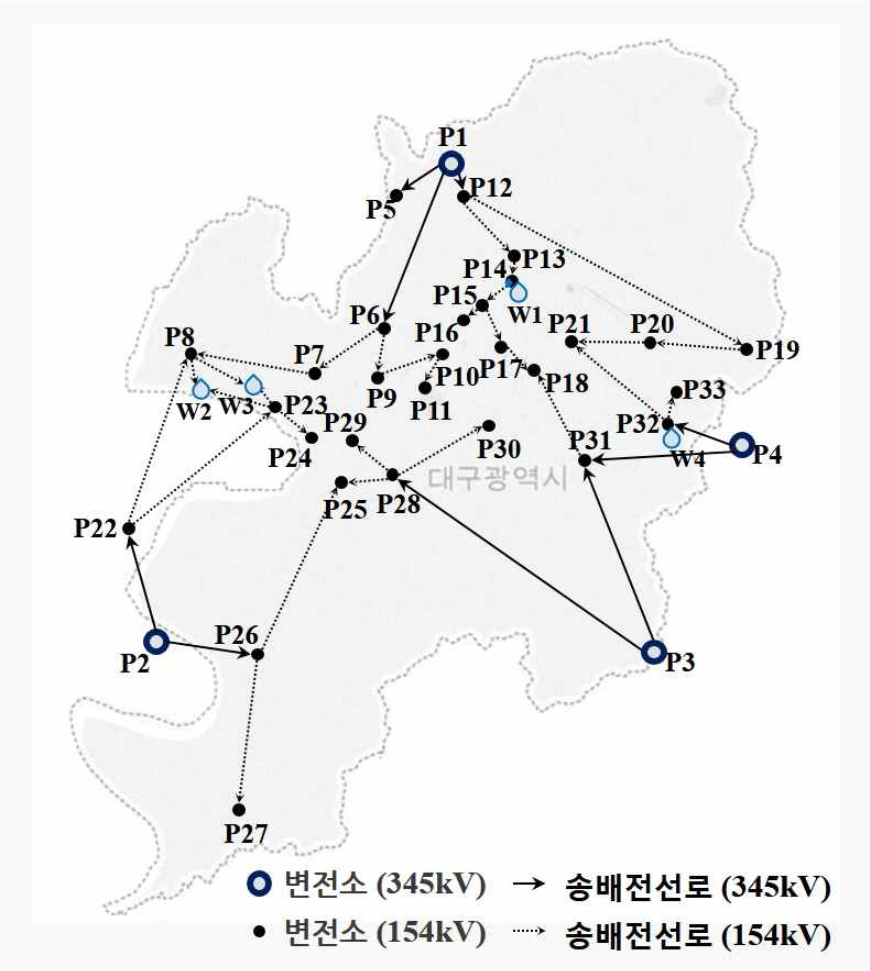
2) 개발 결과

- 국내 대구경북 지역의 전력 시스템은 대구광역시와 포항시, 경주시 등을 포함하여 총 23개의 구역에 전력을 공급하기 위한 발전소 6곳([그림 9]의 1~6번 노드)과 345kV 변전소 10곳([그림 9]의 7~16번 노드)으로 구성됨.
- 이때 **지역 외부로부터의 전력 공급원은 북경남변전소([그림 9]의 17번 노드) 하나로 한정하며 그 외의 전력 교환은 닫힌계로 가정**함.
- 상수도 시스템의 경우 대구경북 지역 내 정수장과 가압장만 각각 96곳, 1096곳으로 그 수가 많기 때문에 본 연구에서는 모델 구성의 편의를 위해서 인구가 가장 밀집된 대구시에 위치한 정수장 4곳([그림 9]의 W1~W4번 노드)에 한해 분석을 수행하였음.



[그림 9] 대구경북지역의 전력 및 상수도 네트워크 2D 지도

- 또한 1차년도 전문가 평가 결과 당시 GIS지도가 시각화 도구로써 한정될 경우, 2D 지도 내 보다 자세한 분석결과를 제시하는 방안이 제안되었으므로, 이러한 의견을 수용하여 [그림 10]과 같이 대구 지역 내 전력 및 상수도 공급계통 네트워크 지도를 구축함.
- 대구지역의 경우 발전소가 위치하고 있지 않기 때문에, 전력 공급의 최상위 노드는 345kV 변전소가 되며, [그림 9]의 12~15번 노드가 [그림 10]의 P1~P4번 노드와 대응되어 지역 내 분포된 154kV 변전소 29곳([그림 10]의 P5~P33번 노드)으로 전력을 공급함.
- 마찬가지로 상수도 공급의 최상위 노드는 정수장으로 [그림 9]와 [그림 10]에서 공통적으로 W1~W4번 노드로 표시되며, 상수는 15개의 가압장([그림 10]의 W5~W17, W21, W23번 노드)과 5개의 저수탱크([그림 10]의 W18~20, W22, W24번)을 거쳐 최종 소비자에게 공급됨.



[그림 10] 대구지역의 전력 및 상수도 네트워크 2D 지도 상세

- 따라서 첫 번째 네트워크 지도의 경우 **최종 공급 서비스는 전력, 최종 수요자는 대구경북지역의 216만 8500가구가 되며, 두 번째 네트워크 지도의 경우 최종 공급 서비스는 전력과 상수, 최종 수요자는 대구시내에 주거하는 99만 4000가구임**.
- 전력 및 상수도 시스템 구성요소에 대한 추가적인 정보는 본 연구의 질적성과 중 하나인 라이프라인시스템 특성 데이터베이스에서 확인할 수 있으며, 명칭, 종류, 위치, 용량 등의 개략적인 정보는 다음의 [표 7] 및 [표8]과 같음.

[표 7] 대구경북지역 전력 네트워크 구성요소 상세 정보

Index	명칭		종류	위치 (위도, 경도)		*용량 (가구)
1	한울	Hanul	발전소	37.0989	129.3731	-
2	예천	Yecheon		36.7527	128.4267	-
3	안동	Andong		36.5966	128.5403	-
4	청송	Cheongsong		36.4060	129.0160	-
5	월성	Wolsong		35.7103	129.4729	-
6	신월성	New-Wolsong		35.7136	129.4760	-
7	신영주	New-Yeongju	345kV 변전소	36.7741	128.5667	-
8	선산	SeonSan		36.1465	128.4533	-
9	신영일	New-Yeongil		36.0805	129.2448	-
10	포스코	Posco		35.9991	129.3892	-
11	신포항	New-Pohang		35.9403	129.4061	-
12=P1	북대구	North-Daegu		35.9561	128.5741	409,400
13=P2	고령	Goryeong		35.7355	128.4049	181,800
14=P3	대구	Daegu		35.7311	128.6889	252,900
15=P4	신경산	New-Gyeongsan		35.8283	128.7387	149,900
16	울주	Uljo		35.6782	129.2115	71,000
17	북경남	North-Gyeongnam		35.6151	128.5503	-
P5	관음	Gwaneum	154kV 변전소	35.9424	128.5419	35,000
P6	달서	Dalseo		35.8806	128.5359	47,000
P7	와룡	Waryong		35.8607	128.4958	28,000
P8	다사	Dasa		35.8703	128.4252	16,000

Index	명칭		종류	위치 (위도, 경도)		*용량 (가구)
P9	팔달	Paldal	154kV 변전소	35.8586	128.5324	24,000
P10	내당	Naedang		35.8694	128.5689	19,000
P11	두류	Duryu		35.8540	128.5586	19,000
P12	구암	Guam		35.9454	128.5751	52,000
P13	검단	Geomdan		35.9141	128.6107	49,000
P14	산격	Sangyeok		35.9034	128.6086	11,000
P15	침산	Chimsan		35.8925	128.5913	6,000
P16	서침산	West-Chimsan		35.8869	128.5839	15,000
P17	동인	Dongin		35.8728	128.6014	20,000
P18	남대구	South-Daegu		35.8617	128.6208	21,000
P19	반야월	Banyawol		35.8717	128.7411	26,000
P20	안심	Ansim		35.8747	128.6871	36,000
P21	효목	Hyomok		35.8751	128.6416	29,000
P22	다산	Dasan		35.7883	128.3894	14,000
P23	강창	Gangchang		35.8452	128.4734	46,000
P24	성서	Seongseo		35.8312	128.4935	38,000
P25	달성	Dalseong		35.8102	128.5105	43,000
P26	논공	Nongong		35.7296	128.4626	30,000
P27	유가	Yuga		35.6582	128.4532	21,000
P28	상인	Sangin		35.8141	128.5404	81,000
P29	월배	Wolbae		35.8299	128.5177	44,000
P30	봉덕	Bongdeok		35.8369	128.5950	70,000
P31	범물	Beommul		35.8203	128.6497	75,000
P32	노변	Nobyeon		35.8367	128.6975	47,000
P33	경산	Gyeongsan		35.8519	128.7007	32,000

* 용량 정보는 구성요소와 최종 수요자까지 거리를 기반으로 본 연구에서 가정한 값임.

[표 8] 대구지역 상수도 네트워크 구성요소 상세 정보

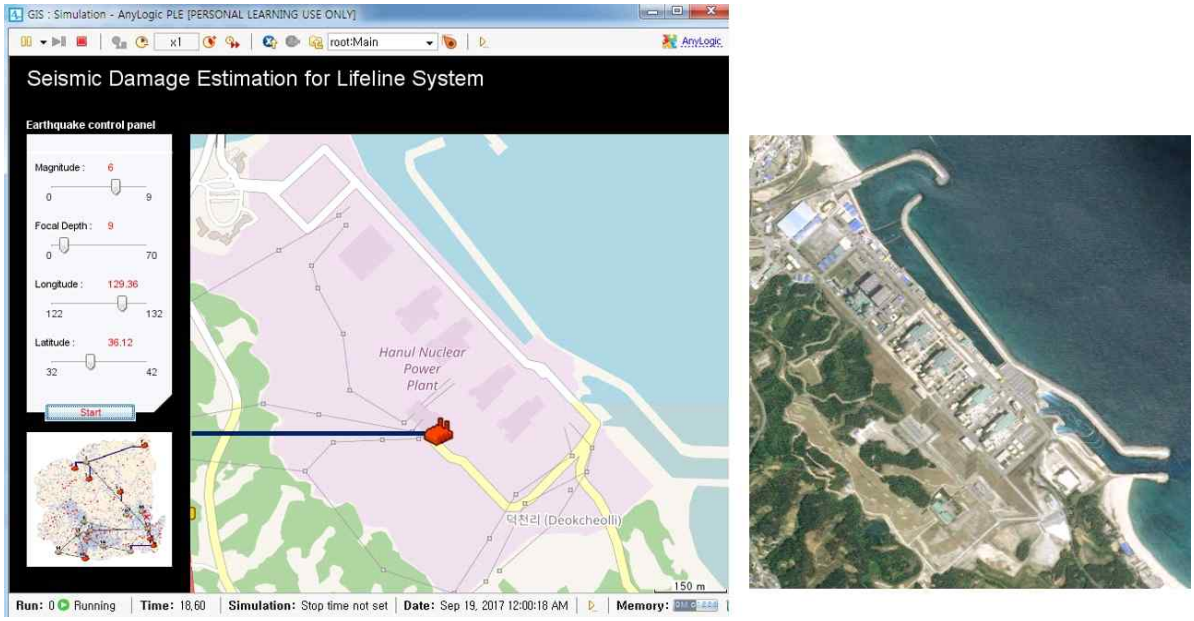
Index	명칭		종류	위치 (위도, 경도)		*용량 (가구)
W1	**공산	Gongsan	정수장	35.9016	128.6042	37,300
W2	문산	Munsan		35.8554	128.4249	-
W3	매곡	Maegok		35.8587	128.4503	-
W4	고산	Gosan		35.8309	128.6968	-
W5	구암	Guam	가압장	35.9390	128.5688	45,600
W6	내당	Naedang		35.8540	128.5611	66,800
W7	만촌	Manchon		35.8566	128.6483	63,600
W8	범물	Beommul		35.8244	128.6253	49,500
W9	범어	Beomeo		35.8613	128.6313	60,700
W10	봉덕	Bongdeok		35.8414	128.5998	45,700
W11	상동	Sang-dong		35.8288	128.6081	60,000
W12	상인	Sangin		35.8184	128.5447	106,700
W13	송현	Songhyon		35.8305	128.5490	75,000
W14	신서	Sinseo		35.8830	128.7172	16,900
W15	앞산	Apsan		35.8385	128.5698	69,100
W16	옥포1	Okpo		35.7884	128.4739	28,300
W17	칠곡	Chilgok		35.9340	128.5476	44,500
W18	본리	Bon-ri	저수탱크	35.8312	128.5396	29,500
W19	***부곡	Bugok		35.8731	128.4506	-
W20	상리	Sang-ri		35.8649	128.5320	92,100
W21	서변	Seobyun	가압장	35.9148	128.5917	18,400
W22	안심	Ansim	저수탱크	35.8782	128.6985	29,400
W23	옥포2	Okpo	가압장	35.7815	128.4497	28,300
W24	이곡	Igok	저수탱크	35.8608	128.5011	26,600

* 용량 정보는 구성요소와 최종 수요자까지 거리를 기반으로 본 연구에서 가정한 값임.

** 공산 정수장은 최종 소비자에게 직접 정수를 공급 함.

*** 부곡 저수탱크는 소비자에게 직접 정수를 공급하지 않으며, 연결의 역할로만 사용됨.

- 이와 같이 본 연구의 라이프라인시스템 특성 데이터베이스를 기반으로 개발된 네트워크 지도는 해당 지역의 전력 및 상수도시스템을 운영하는 전력거래소와 상수도사업본부에서 제공되고 있는 지도와 비교해보았을 때 매우 유사함을 확인할 수 있음.
- 더하여 본 연구가 개발한 2D 지도는 전력 및 상수도 네트워크뿐만 아니라 최종수요자 분포에 대한 정보 또한 포함하고 있는데, [그림 9]에서 작은 원으로 표시된 항목 하나가 최종수요자 500 가구를 의미하므로 **비교적 수요가 밀집된 대구광역시와 구미시, 경산시, 포항시 등에 전력 또는 상수도를 제공하는 거점시설이 기능정지 하는 경우 많은 피해가 발생할 것을 예측**할 수 있음.
- 또한 본 연구진은 GIS 라이브러리 및 복합 시뮬레이션 기술을 제공하는 Anylogic 소프트웨어를 사용하여 상기 2D 지도를 GIS 기반으로도 구축하였는데, [그림 11]은 본 연구 분석대상 중 한울 원자력발전소에 대하여 GIS 맵핑 네트워크 지도가 Anylogic 소프트웨어로 구현된 화면과, 구글에서 제공하는 실제 항공사진을 비교한 결과임.



[그림 11] GIS 맵핑 네트워크 지도 예시 : 한울 원자력발전소

- 국내의 경우 보안의 문제로 인하여 원자력발전소 등 일부 표현되지 않는 항목이 있으나 한울 원자력발전소의 경우 항공사진에 보이는 총 4개의 원전이 GIS지도에도 포함됨을 확인할 수 있으며 관련 전문가를 통해 해당 지도가 연구개발 목적에 적정하게 개발됨을 평가받았음.
- 최종적으로 본 연구는 Excel 데이터를 기반으로 시각화 분석기능을 제공하는 Tableau 플랫폼을 활용하여, **"대구·경북지역 라이프라인 네트워크 지도" 소프트웨어 (등록번호: C-2018-024578)를 개발**하였으며 해당 소프트웨어의 특징, 주요 기능 및 대표 화면은 아래와 같음.

- 특징: 본 프로그램은 국내 대구·경북지역의 라이프라인시스템 특성 데이터베이스에서 거점시설(Node)의 위치자료(위도, 경도)와 속성자료(명칭, 유형, 연결시설, 용량)를 추출하여 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)에 시각화하는 것을 목적으로 함.

- 기본기능

1) 스프레드시트에서 데이터 가져오기 기능

2) 라이프라인시스템 거점시설 매핑(Mapping) 기능

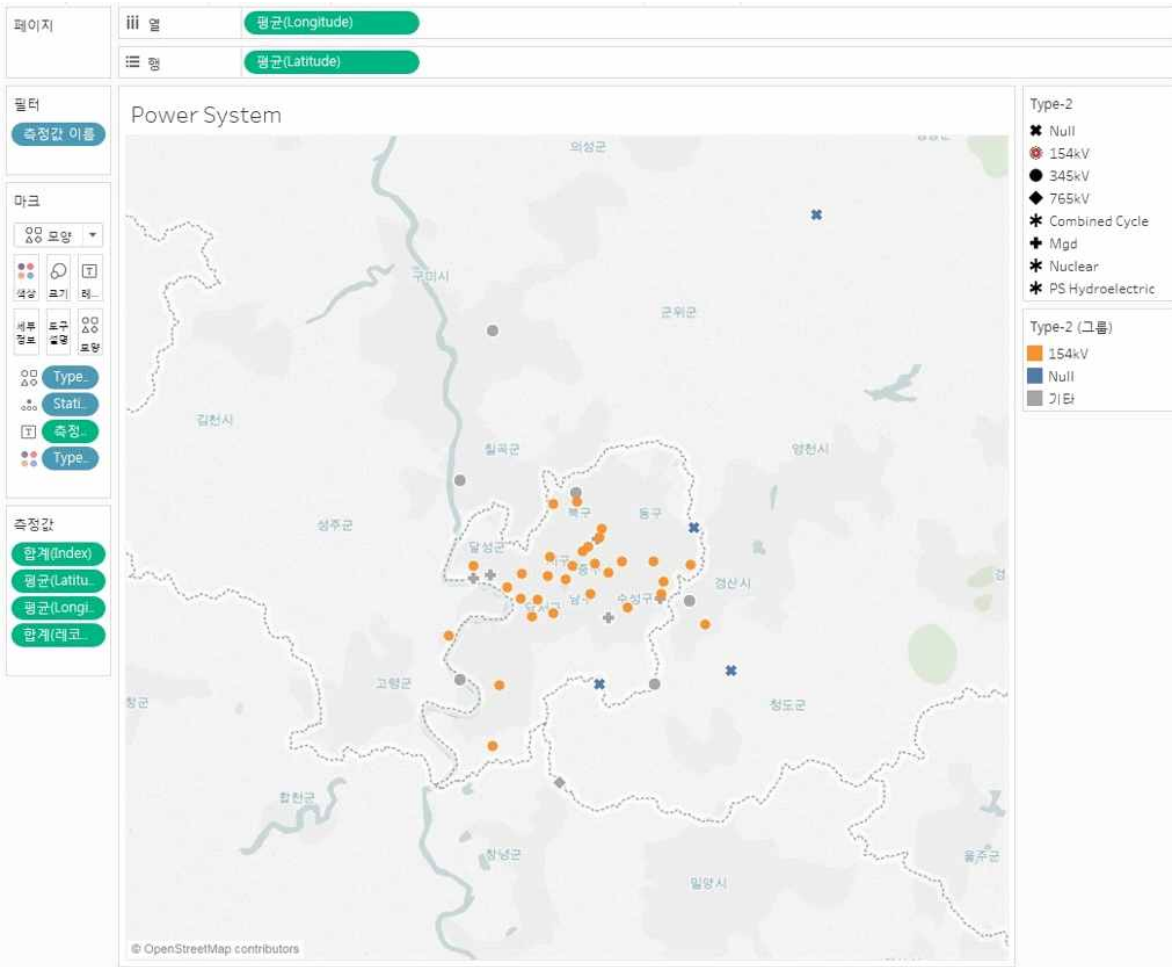
3) 라이프라인시스템 연결경로 매핑(Mapping) 기능

4) GIS기반 라이프라인 네트워크 지도 작성 기능

- 부가기능 (라이프라인 네트워크 연쇄피해 예측 프로그램(C-2017-026647)과 연동 시)

1) 임의의 지진 시나리오에 대하여 개별 거점시설의 연쇄피해 발생확률(%) 산정 후 지도 내 시각화 (연쇄피해 발생확률 5%미만: 회색, 5%이상 40%미만: 노란색, 40%이상 70%미만: 주황색, 70%이상: 빨간색)

2) 임의의 지진 시나리오에 대하여 연결경로의 사용 가능성 지도 내 시각화 (연쇄피해 발생확률 70%이상인 거점시설과 연결된 연결 경로 점선 표시)



[그림 12] 대구·경북지역 라이프라인 네트워크 지도 SW 대표화면

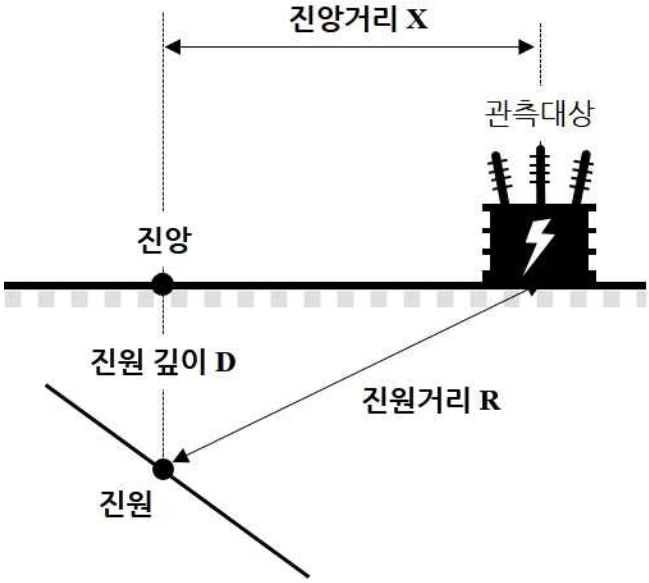
나. 라이프라인 시스템 구성요소 지진 취약도 평가 모듈

❑ 지진 규모별 최대지반가속도 감쇠함수

1) 개발 개요

- 특정 위치에서 지진으로 인한 지반 운동을 나타내는 동적 지표로는 최대지반 속도(Peak ground velocity, PGV), 최대지반가속도(Peak ground acceleration, PGA), 최대지반변위(Peak ground displacement, PGD) 등이 있음.
- 이 중 최대지반가속도는 실제 지진 발생 시 지진 가속도 계측기에서 획득할 수 있는 자료로써 진앙 거리에 따른 개략적인 지진 피해 수준을 실시간 혹은 조기에 추정하기에 적합함(오상훈 2014).
- 그러나 <u>국내와 같이 계측 가능한 규모의 지진 발생 확률이 낮고 더욱이 계측기가 설치된 구조물이 많지 않은 경우 최대지반가속도는 지진의 규모(M, 모멘트규모), 진원 깊이(D, km), 진앙거리(X, km) 및 진원거리 (R, km), 전단파 속도 (V_{330}, km/s) 등 다양한 지표를 사용하여 개발된 지진동 감쇠함수로 추정할 수 있음</u>.
- 일반적으로 지진동 감쇠함수는 상용로그 또는 자연로그로써 표현되며, 다음 기본 식과 같음(Boore and Atkinson 2008):

$$\ln Y = f_M(M) + f_D(R, M) + f_S(V_{S30}, R, M) \qquad \text{(식 2)}$$



[그림 13] 진앙거리와 진원거리

- 이때 미국 서부지역이나 일본과 같이 강진동지역에서는 과거 발생한 강진의 이력자료를 토대로 지진동 감쇠함수를 개발하였으나, <u>국내와 같은 중·약진 지역의 경우 계기지진 데이터를 축적한 기간이 짧고 해석에 사용 가능한 유의미한 강진 기록이 적은 편</u>임.
- 이에 대부분 해외의 지반 운동을 바탕으로 개발된 지진동감쇠식을 상수 값을 보정하여 사용하였으나, <u>기반암 깊이가 비교적 낮은 국내 지반의 경우 적합한 모사가 어려울 수 있음</u>.

2) 개발 결과

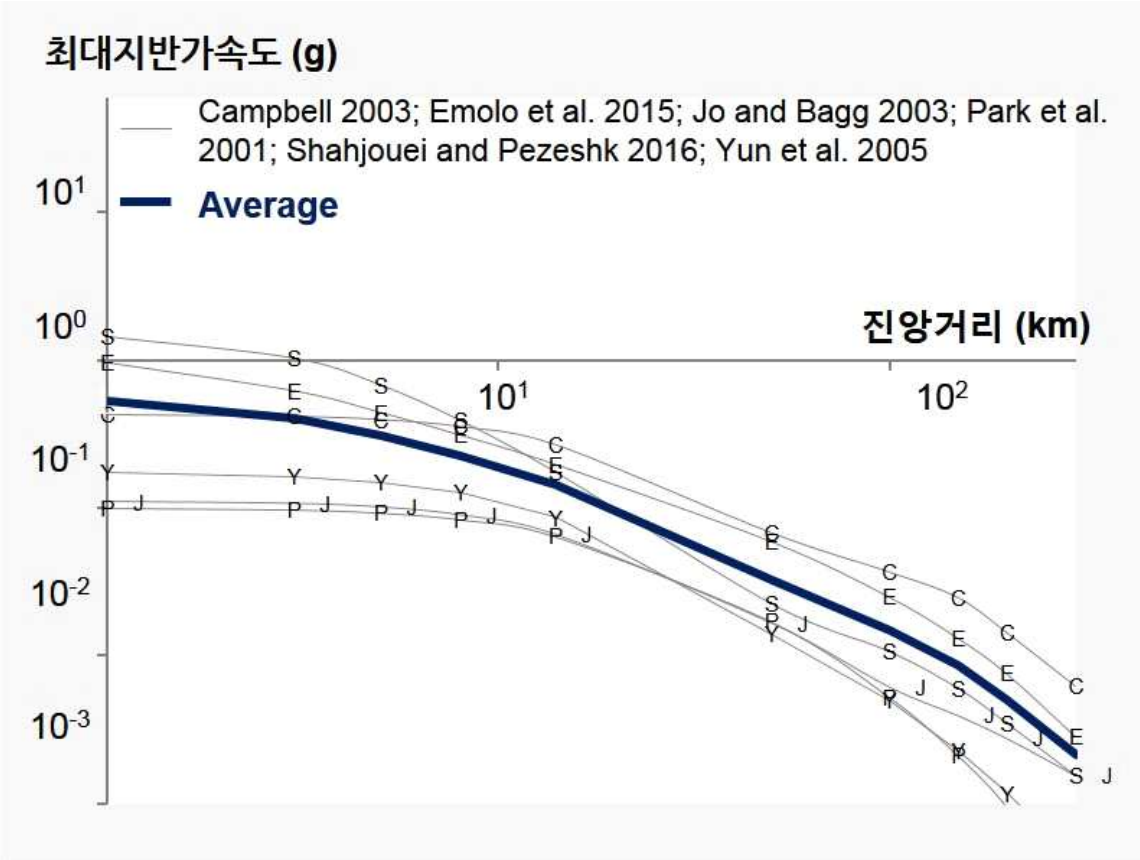
- 본 연구에서는 <u>한반도를 대상으로 하고 있거나, 비교적 국내와 지반 특성이 유사한 중·약진지역(예: 미국 중동부지역, 호주 등)에서의 지진파 발생과 부지의 특성을 반영하여 개발된 감쇠식 총 6개를 통해 추정되는 최대 지반가속도의 평균을 대푯값으로 사용</u>하며, 이에 대한 상세 내용은 다음 [표 9]와 같음.

[표 9] 본 연구에 사용된 지진동 감쇠함수

연구자	방정식
Campbell (2003)	$Y = c_1 + c_2 M_w + c_3(8.5 - M_w)^2 + c_4 \ln R^* + (c_5 + c_6 M_w)R$ $R^* = \sqrt{R^2 + (c_7 e^{c_8 M_w})^2}$ where $Y = \ln(PGA)$ [g]; M_w = moment magnitude; R = hypocentral distance [km]; c_1 = 0.907; c_2=0.983; c_3 = -0.066; c_4 = -2.7; c_5 = 0.159; c_6 = -2.8; c_7 = 0.212; c_8 = -0.301.
Emolo et al. (2015)	$Y = a + bM_w + c\log R^* + dX + e$ $R^* = \sqrt{X^2 + h^2}$ where $Y = \log(PGA)$ [cm/sec2]; M_w = moment magnitude; X = epicentral distance [km]; a = -3.07; b =0.73; c = -0.76; d = -0.0029; e = 0.3260; h = 1.7.
Jo and Bagg (2003)	$Y = c_0 + c_1 R + c_2 \ln R - \ln R^* - 0.5 \times \ln R^{**}$ $R^* = \min(R, 100)$ $R^{**} = \max(R, 100)$ $c_0 = c_{00} + c_{01}(M_w - 6) + c_{02}(M_w - 6)^2 + c_{03}(M_w - 6)^3$ $c_1 = c_{10} + c_{11}(M_w - 6) + c_{12}(M_w - 6)^2 + c_{13}(M_w - 6)^3$ $c_2 = c_{20} + c_{21}(M_w - 6) + c_{22}(M_w - 6)^2 + c_{23}(M_w - 6)^3$ where $Y = \ln(PGA)$ [gal]; M_w = moment magnitude; R = hypocentral distance [km]; c_{00} = 10.7383; c_{01}=0.5909; c_{02} = -0.0562; c_{03} = 0.0214; c_{10} = -0.0024; c_{11} = 0.0002; c_{12} = -0.00002; c_{13} = 0.00004; c_{20} = -0.2437; c_{21} = 0.095; c_{22} = -030088; c_{23} = -0.0033.

연구자	방정식
Park et al. (2001)	$Y = c_0 + c_1 R - \log R$ $c_0 = c_{00} + c_{01}(M_w - 6) + c_{02}(M_w - 6)^2 + c_{03}(M_w - 6)^3$ $c_1 = c_{10} + c_{11}(M_w - 6) + c_{12}(M_w - 6)^2 + c_{13}(M_w - 6)^3$ where $Y = \ln(PGA)$ [gal]; M_w = moment magnitude; R = hypocentral distance [km]; c_{00} = 3.391; c_{01}=0.3601; c_{02} = -0.0362; c_{03} = 0.0064; c_{10} = -0.0037; c_{11} = 0.0013; c_{12} = -0.0001; c_{13} = -0.000027.
Shahjouei and Pezeshk (2016)	$Y = c_1 + c_2 M_w + c_3 M_w^2 + (c_4 + c_5 M_w) f_1(R^*) + (c_6 + c_7 M_w) f_2(R^*) + (c_8 + c_9 M_w) f_3(R^*) + c_{10} R^*$ $R^* = \sqrt{X^2 + c_{11}^2}$ $f_1(R^*) = \min(\log R^*, \log 60)$ $f_2(R^*) = \max[\min\{\log(R^*/60), \log(120/60)\}, 0]$ $f_3(R^*) = \max\{\log(R^*/120), 0\}$ where $Y = \log(PGA)$ [g]; M_w = moment magnitude; R = hypocentral distance [km]; c_1 = -0.3002; c_2=0.5066; c_3 = -0.0453; c_4 = -3.224; c_5 = 0.2998; c_6 = -1.283; c_7 = 0.1045; c_8 = -3.0856; c_9 = 0.2778; c_{10} = -0.0008; c_{11} = 3.81.
Yun et al. (2009)	$Y = c_1 + c_2 M_w + (c_3 + c_4 M_w) f_1(X) + c_6 (M_w - 6)^2 + c_7 f_2(R) + c_8 f_3(R)$ $f_1(X) = \ln(X + e^{c_5})$ $f_2(X) = \ln\{\min(R, 50)\}$ $f_3(X) = \ln\{\max(R, 50)\}$ where $Y = \ln(PGA)$ [g]; M_w = moment magnitude; X = epicentral distance [km]; R = hypo-central distance [km]; c_1 = 35.768; c_2=-2.357; c_3 = -6.884; c_4 = 0.579; c_5 = 5.237; c_6 = -0.139; c_7 = -1.1218; c_8 = -0.488.

- 상기 6개 지진동감쇠식은 지진 거리를 나타냄에 있어 서로 다른 입력변수(예: 진앙거리, 진원거리)와 단위(예: g, gal, m/sec^2)를 사용하고 있으므로 **데이터 속성의 통일을 위하여 본 연구에서는 진앙거리와 중력가속도 g(=0.01gal =9.81m/sec^2)를 기준으로 각 식을 변환하여 사용**함.
- [그림 14]는 최종적으로 변환된 6가지 감쇠함수와 그 평균을 비교하기 위해 진앙거리를 x축, 최대지반가속도를 y축으로 작성한 로그 등 간격 그래프로, 이때의 지진규모, 위치, 진원 깊이 등은 경주지진(M=5.5, D=14.1km, Lat=35.7632, Long=129.1898)의 사례를 가정하였으며 개별 감쇠식은 대표연구자 성의 알파벳 첫 글자로 표식하고 굵은 실선은 평균값임.



[그림 14] 진앙거리에 따른 최대지반가속도 감쇠 (경주지진)

- 이를 통해 진앙과 가까이 위치한 구조물의 경우 Shahjouei and Pezeshk(2016)과 Emolo(2015)의 감쇠식은 다른 감쇠식과 비교하여 최대지반가속도를 다소 크게, 연관희(2005), 조남대와 박창업(2003), 박동희(2001)과 같은 국내 연구자의 감쇠식은 다소 작게 추정하고 있음을 알 수 있음.
- 그러나 본 연구에서 활용하고자 하는 추정식의 평균값은 2016년 9월 12일 경주지진(모멘트 규모 5.5, 진원깊이 14.1km, 위도 35.7632, 경도 129.1898, 보통암 지반 가정) 당시 명계리(MKL)와 덕정리(DKJ) 관측소에서 계측된 **실제 최대지반가속도 값(이철호, 2017)과 유사하였으며, 두 관측소의 경우 오차율이 3%미만(평균 오차율 2.15%)임에 따라 본 연구결과가 최대지반가속도를 추정하는데 적정함을 확인**하였음.

- 다만 진앙거리 약 8km의 울산(USN) 관측소의 경우, 진앙거리 약 6km의 명계리(MKL) 관측소의 경우보다 큰 최대지반가속도 값이 계측되어 본 연구가 가정하고 있는 거리에 따른 지진동 감쇠와 상이한 결과를 보였는데 이는 울산(USN) 관측소의 지반조건에 따른 지반 증폭 현상 때문으로 추정됨.
- 따라서 본 절의 지진 규모별 최대지반가속도 감쇠함수는 [그림 15]와 [표 10]에서와 같이 일반적으로 **보통암 조건에서 예측의 정확성이 높고, 실제 지반 분포 조사가 함께 수행되는 경우 보다 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있음**.

[그림 15] 본 연구의 지진동 감쇠 예측식과 실제 계측값과의 비교

[표 10] 경주지진 당시 관측소에서 계측된 최대지반가속도와의 비교

관측소 코드	진앙거리 (km)	PGA 계측값 (g) A	PGA 예측값 (g) B	오차 (g) |A-B|	오차율 (%) |A-B| / A	계측값 출처
MKL	5.86	0.291	0.297	0.006	2.1	이철호 (2017)
USN	8.23	0.396	0.237	0.159	40.2	
DKJ	22.15	0.090	0.092	0.002	2.2	
KNWA	28.00	0.098	0.071	0.027	27.6	한국 수력 원자력 (2017)
KNKA	51.00	0.054	0.036	0.018	33.3	
KNUA	148.00	0.006	0.010	0.004	66.7	
KNYA	254.00	0.005	0.006	0.001	20.0	
DAG2	26.50	0.105	0.075	0.03	28.6	기상청 지진연보 (2017)
MIYA	50.10	0.057	0.037	0.02	35.1	
PHA2	50.80	0.040	0.036	0.004	10.0	
CHR	67.50	0.044	0.026	0.018	40.9	
평균	64.74	0.108	0.084	0.026	22.2%	-

❑ 라이프라인 단일 구성요소의 손실예측함수

1) 개발 개요

- 지진은 발생, 전파, 구조물 거동까지 각 단계별 필연적인 불확실성을 내포하기 때문에, 지진으로 인한 손실을 예측하기 위해서는 정해진 설계 기간 동안 임의의 규모를 갖는 지진에 의하여 구조물이 붕괴 방지 수준을 초과할 확률을 추정하는 지진취약도함수가 사용됨.
- 국내에서도 라이프라인시스템의 안전성 확보에 대한 사회적 관심이 증가함에 따라 지진 취약도 관련 연구가 활발히 진행되고 있으나, 선행연구 검토 및 전문가 자문을 수행한 결과 원자력발전소의 경우 보안의 문제로 관련 데이터가 외부로 제공될 수 없으며, 상수도 계통의 경우 아직 관련 연구가 부족한 상황임.
- 즉 **현재 공개적으로 배포된 국내 지진취약도 관련 데이터는 2008년 한국원자력연구원의 "전력시설물의 지진취약도함수 국산화연구"에서 변전소 지진응답해석을 통해 개발한 함수에 한정됨**.
- 따라서 본 연구에서는 변전소를 대상으로 해당 함수를 사용하여 지반거동으로 인한 변전소의 초기 손실을 예측하며, **국내에 적합한 사례 연구가 없는 발전소, 정수장, 저수탱크, 가압장의 경우 미 연방 재난관리청 FEMA의 지진취약도함수를 준용**함.
- 해당 함수는 미국에서 기존 발생한 30개 이상의 지진 재해를 기반으로 작성되어 신뢰도가 높고 시설물 목적, 구조, 재료 등 매우 다양한 요인을 고려하여 개발되었으며, 특히 터키, 중국, 일본 등 다수의 지역에 적용한 연구를 통해 그 활용을 인정받았기에 본 연구에서 활용하기 적합할 것으로 사료됨.

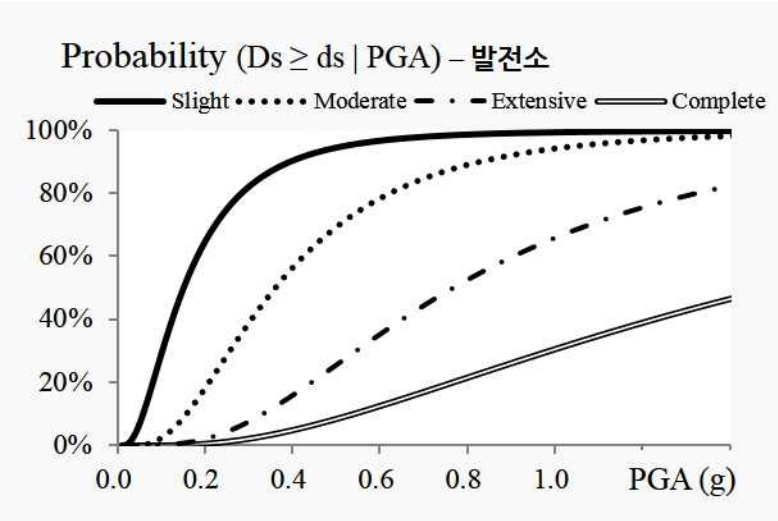
2) 개발 결과

- 지진으로 인한 시설물의 손실예측함수는 일반적으로 독립적으로 기능하는 구조물에 대하여 손상 수준 별 최대지반가속도의 중앙값(Median)과 불확실성을 나타내는 계수인 표준편차(Standard Deviation, β)의 로그정규분포(Log-normal Distribution)의 형태로 제시됨.
- 다음 [표 11]은 본 연구의 분석대상인 **발전용량 100MW 이상 중대형발전소, 송전전압 345kV 변전소, 송전전압 154kV 변전소, 시설용량 50mgd이상 200mgd미만의 중형 정수장, 지상에 설치된 저수탱크, 시설용량 10mgd 미만의 소형 가압장의 지진 취약도 함수**를 정리한 것임.
- 이때 개별 구성요소의 손상 수준은 손상 없음(None, d1)을 포함하여 약간손상(Slight, d2), 보통손상(Moderate, d3), 심각손상(Extensive, d4), 완전손상(Complete, d5)의 5단계로 구분되며, 지진 취약도 함수는 각 손상 단계별 최대지반가속도의 중앙값과 표준편차로서 표현됨.
- 예를 들어, [표 11]에 따르면 임의의 154kV 변전소가 위치한 지점에서 계측된 최대지반가속도가 약 0.31g인 경우, 해당 변전소는 "약간 손상"의 손상 단계에 위치할 확률이 가장 높음.
- 개별 구성요소별 지진 취약도 함수는 다음 [그림 16]에서 [그림 21]과 같이 그래프로도 나타낼 수 있음.

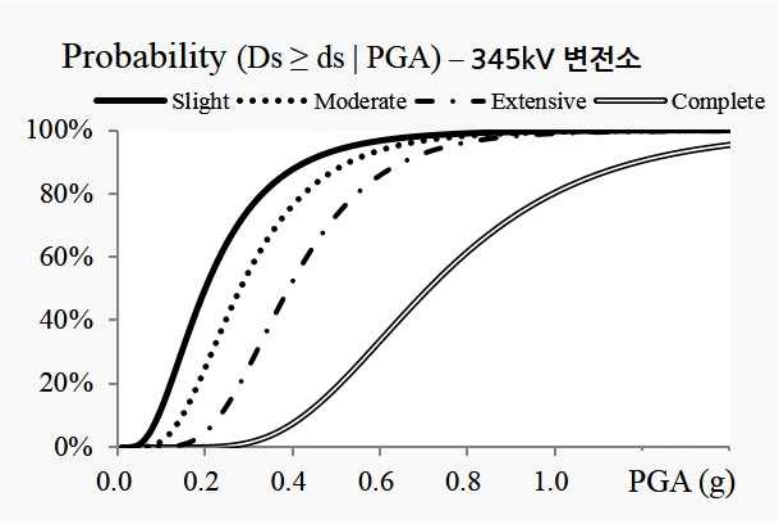
[표 11] 본 연구에서 활용하는 지진 취약도 함수

분류		피해 단계	최대지반가속도 중앙값(Median, g※)	표준편차(β)	출처
시스템	구성요소				
전력 네트워크	중대형 발전소 (발전용량 200MW이상)	약간손상(d2)	0.1	0.6	FEMA (2003)
		보통손상(d3)	0.25	0.6	
		심각손상(d4)	0.52	0.55	
		완전손상(d5)	0.92	0.55	
	345kV 변전소	약간손상(d2)	0.20	0.60	한국 원자력 연구원 (2008)
		보통손상(d3)	0.28	0.50	
		심각손상(d4)	0.39	0.40	
		완전손상(d5)	0.71	0.40	
	154kV 변전소	약간손상(d2)	0.31	0.70	
		보통손상(d3)	0.37	0.55	
		심각손상(d4)	0.46	0.45	
		완전손상(d5)	0.92	0.45	
상수도 네트워크	중형 정수장 (시설용량 50mgd 이상 200mgd 미만)	약간손상(d2)	0.37	0.40	FEMA (2003)
		보통손상(d3)	0.52	0.40	
		심각손상(d4)	0.73	0.50	
		완전손상(d5)	1.28	0.50	
	지상 저수조	약간손상(d2)	0.18	0.60	
		보통손상(d3)	0.42	0.70	
		심각손상(d4)	0.70	0.55	
		완전손상(d5)	1.04	0.60	
	소형 가압장 (시설용량 10mgd 미만)	약간손상(d2)	0.15	0.75	
		보통손상(d3)	0.36	0.65	
		심각손상(d4)	0.66	0.65	
		완전손상(d5)	1.50	0.80	

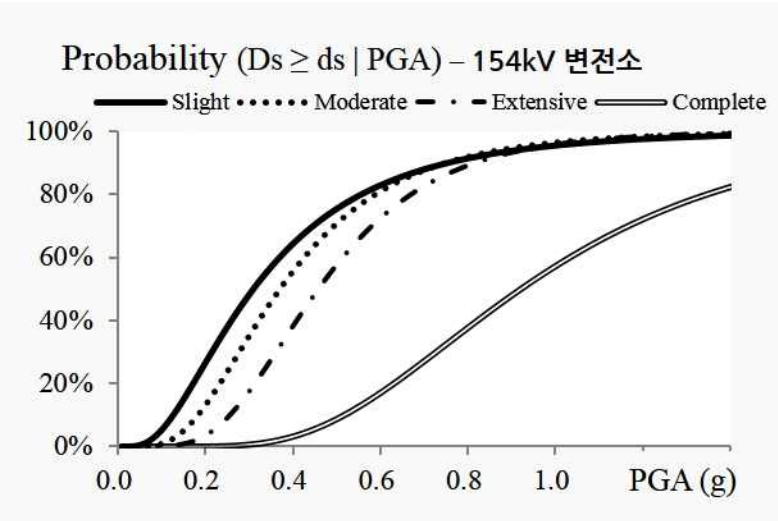
※ g = 중력가속도 9.8m/sec^2



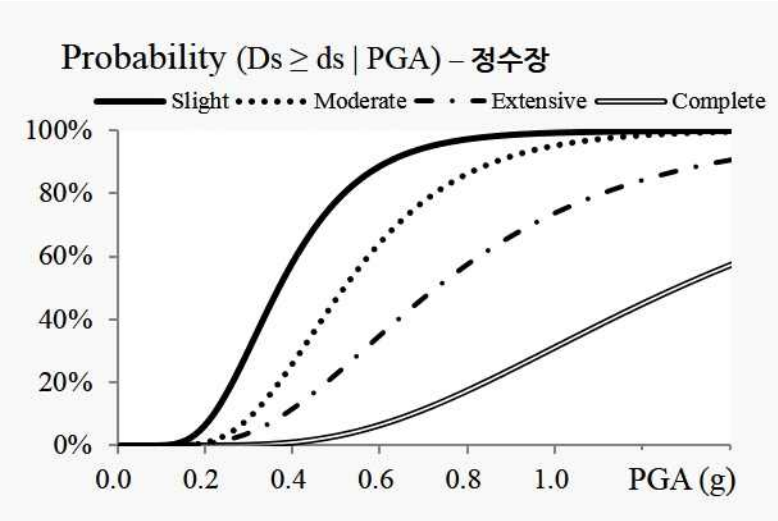
[그림 16] 발전소의 지진 취약도 함수



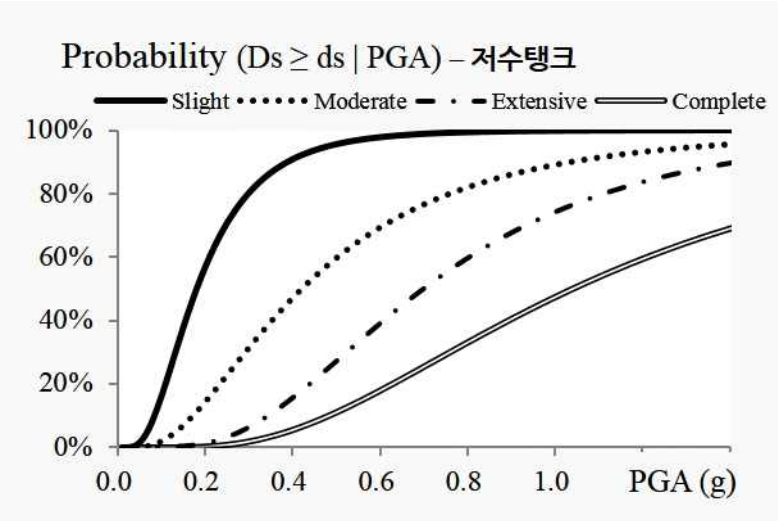
[그림 17] 345kV 변전소의 지진 취약도 함수



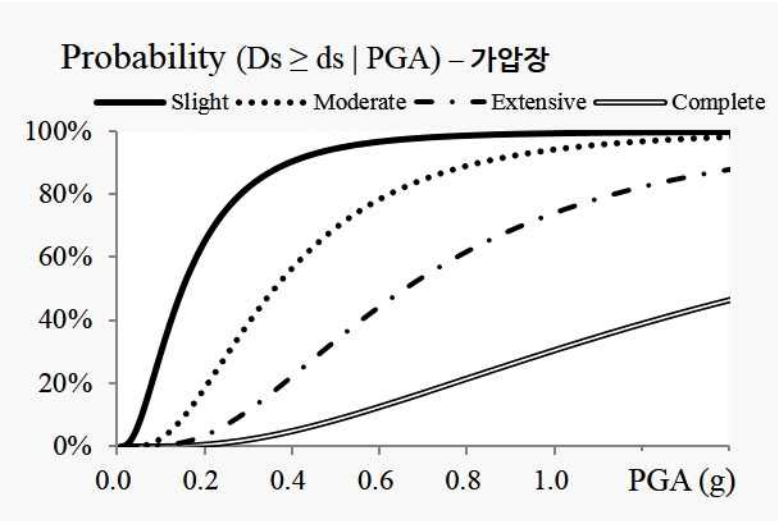
[그림 18] 154kV 변전소의 지진 취약도 함수



[그림 19] 정수장의 지진 취약도 함수

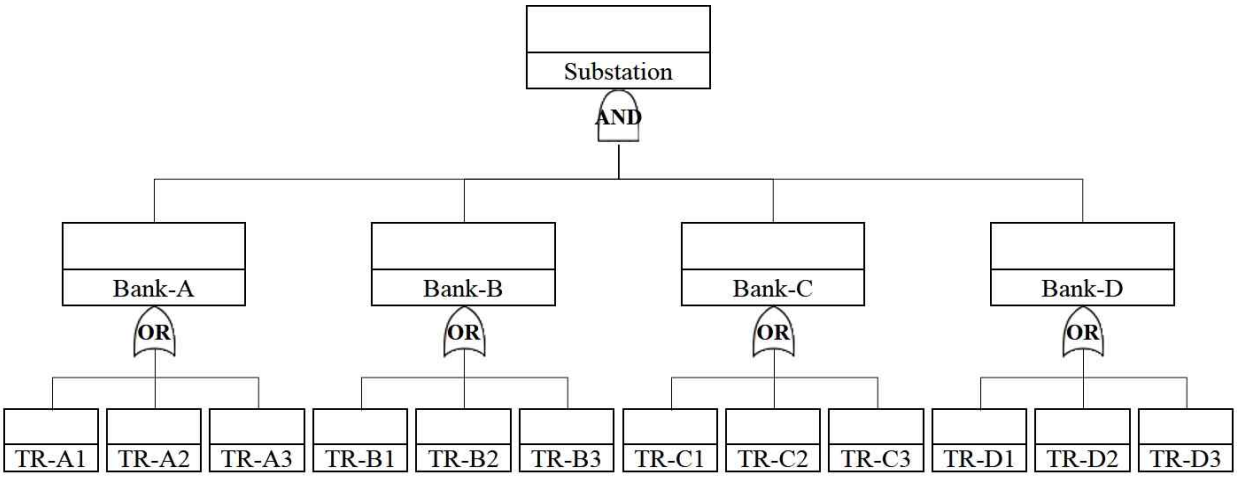


[그림 20] 저수탱크의 지진 취약도 함수



[그림 21] 가압장의 지진 취약도 함수

- 그러나 이와 같이 기존 연구에서 제안한 지진취약도 함수는 최대지반가속도에 따라 개별 구성요소가 각 손상단계에 위치할 확률을 도시하고 있으나, 이때 “약간 손상” 또는 “보통 손상” 등의 <u>단계별 정의가 다소 모호한 관계로 본 연구에서는 개별 구성요소의 특징을 고려하여 해당 함수의 y축을 서비스 제공 가능도(0%~ 100%)의 값으로 변환하여 사용</u>함.



[그림 22] 국내 변전소의 4Bank 시스템 구성도

- 예를 들어, 변전소는 송전되어온 고압전기의 전압을 낮추기 위한 3상 변압기가 설치되어 있으며, 국내의 경우 보통 위의 [그림 22]와 같이 하나의 변전소에 변압기 4대 (변압기 1대=1Bank)까지 설치가 가능함.
- 또한 일반적으로 이러한 4Bank 시스템 내 변압기 하나의 용량은 보통 출력 시 45MVA, 최대 출력 시 60MVA 이므로, 모든 변압기가 정상 작동할 때의 출력을 180MVA로 가정하면, <u>변압기 하나가 망가지는 경우에도 나머지 3개의 변압기를 최대 출력 모드로 전환하여 변전소의 기능을 100% 다할 수 있음</u>.
- 이때 앞선 한국원자력연구원의 선행 연구에서 변압기 1Bank의 손상이 예상 되는 경우를 “약간손상”, 2Bank의 손상을 “보통손상”, 4Bank의 손상을 “심각손상”, 모든 변압기 또는 절연애자의 손상을 완전손상으로 분류하고 있기 때문에 최종적인 손상 단계별 서비스제공가능도는 [표 12]와 같음.

[표 12] 변전소의 손상단계별 서비스제공가능도

손상단계	설명	서비스제공가능도 (%)
약간손상(d2)	▪ 1 BANK 손상 ▪ 최소 1개에서 최대 4개의 Transformer 손상	100
보통손상(d3)	▪ 2 BANK 손상 ▪ 최소 2개에서 최대 6개의 Transformer 손상	100
심각손상(d4)	▪ 4 BANK 손상 ▪ 최소 4개에서 최대 11개의 Transformer 손상	67
완전손상(d5)	▪ 모든 Transformer 손상	0

- 같은 방법으로 발전소 또한 손상단계별 서비스제공가능도를 분류할 수 있는데, 국내의 경우 최대지반가속도가 0.1g 이상으로 계측되는 경우 안전을 위하여 자동 운전 정지되므로, “손상 없음” 또는 “약간손상”의 경우만 100%출력이고 그 외 단계에는 무조건 0% 출력으로 가정함.
- 상수도 네트워크의 경우, 전력 네트워크와 비교하여 손상단계별 구성요소의 거동을 특정할 수 있는 참고자료가 부족한 관계로 FEMA(2003)에서 제공하고 있는 Best Estimate Damage Ratio를 준용하며, 상세 내용은 다음 [표 13]과 같음.

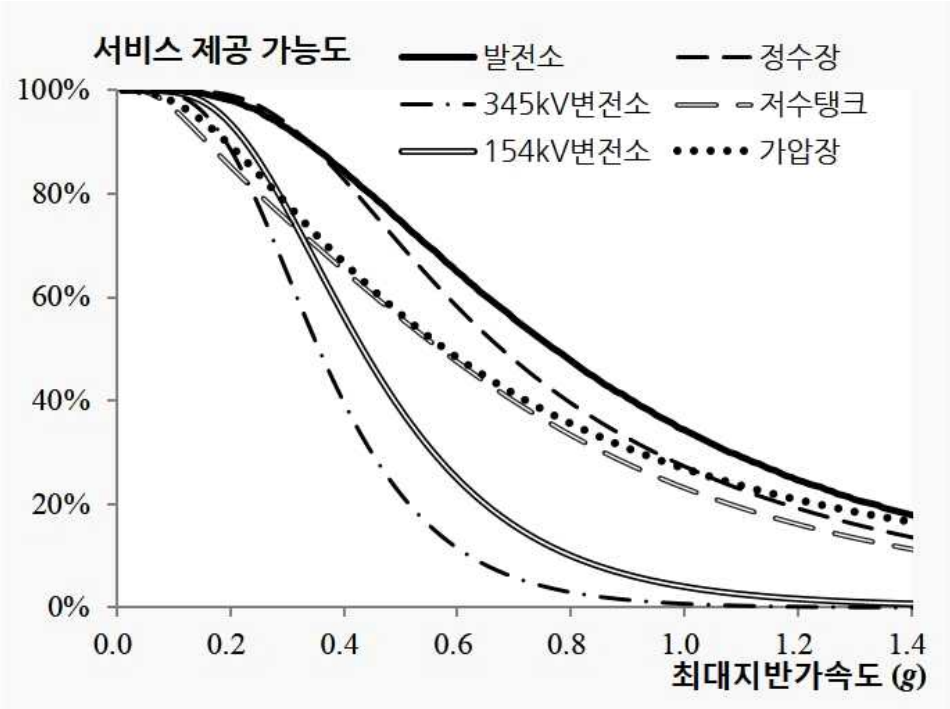
[표 13] 상수도 네트워크 구성요소의 손상단계별 서비스제공가능도

손상단계	서비스제공가능도 (%)		
	정수장	저수탱크	가압장
약간손상(d2)	92%	80%	95%
보통손상(d3)	60%	60%	62%
심각손상(d4)	23%	20%	20%
완전손상(d5)	0%	0%	0%

- 즉, 본 단계에서는 <u>선행연구에서 제시한 지진 취약도 함수를 최대지반가속도(x축)에 따른 서비스제공가능도(y축)함수로 전환하기 위하여 개별 구성요소의 특성을 고려한 손상단계별 대표 서비스제공가능도 값을 제안</u>하였음.
- 이를 통해 최대지반가속도 0.15g를 갖는 154kV 변전소의 손상 발생확률 P(d1, d2, d3, d4, d5)가 아래 [식 3]과 같을 때, 변전소 손상 단계별 서비스제공가능도 값은 [표 12]와 같이 d1=100%, d2=100%, d3=67%, d4=0%, d5=0%이므로, 손상 단계의 발생 확률과 서비스제공가능도 값을 곱하면 최대지반가속도 0.2g에서의 서비스제공가능도가 93.7%로 도출됨.

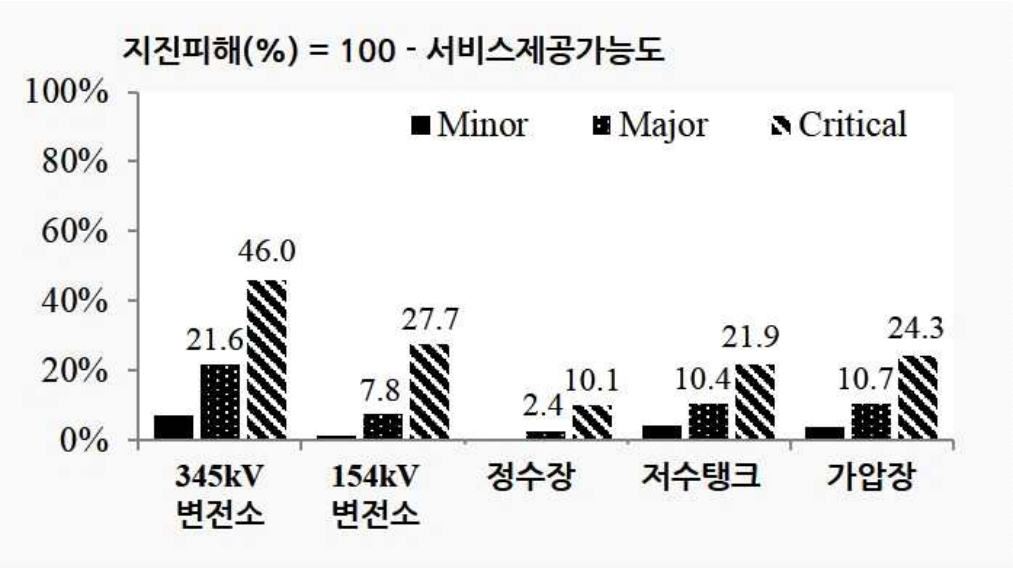
$$
\begin{aligned}
&P(D_s=ds1 \mid PGA=0.15g)=0.50\\
&P(D_s=ds2 \mid PGA=0.15g)=0.35\\
&P(D_s=ds3 \mid PGA=0.15g)=0.13\\
&P(D_s=ds4 \mid PGA=0.15g)=0.02\\
&P(D_s=ds5 \mid PGA=0.15g)=0.00
\end{aligned}
\qquad \text{(식 3)}
$$

$$
\begin{aligned}
&\text{Serviceability}\\
&=0.5\times100\%+0.35\times100\%+0.13\times67\%=93.71\%
\end{aligned}
\qquad \text{(식 4)}
$$



[그림 23] 라이프라인 단일 구성요소의 손실예측함수

- [그림 23]은 변전소의 예시와 같은 방법으로 지진에 의하여 분석대상 구조물이 서비스 제공 가능정도가 얼마나 저하될 것인지를 나타내는 손실예측함수를 작성한 것으로, 가로축에 해당하는 최대지반가속도 값은 앞서 제시한 지진 규모별 최대지반가속도 감쇠함수를 통해 얻을 수 있음.
- 한편 국내 지반 특성을 반영하여 내진 설계방안을 제시한 건축구조기준(KBC 2016)에 의하면 **대구경북지역의 경우 재현주기 2400년의 최대 예상지진 발생 시의 유효지반가속도 값은 약 0.22g로 추정**됨.
- 또한 앞서 제시한 최대지반가속도 감쇠함수에 의하면 **경주지진 당시 해당지역의 평균 최대지반가속도는 0.05g**이며 이를 위 [그림 23]의 손실예측함수에 대입한다면 국내에서는 라이프라인 구성요소의 서비스제공가능도가 10% 이상 저하될 확률이 매우 낮음.
- 그러나 향후 발생 가능한 동시 다발적인 피해의 발현 및 전이를 확인하기 위하여 본 연구에서는 규모 6.0(Minor), 6.4(Major), 6.8(Critical)의 세 가지 지진에 대한 모의 분석을 수행하였음(진원깊이 10km, 진원의 위치는 경주시 내륙으로 한정).
- 그 결과 지진에 의하여 전력 및 상수도 네트워크 구성요소에서 기능 손상이 발생할 확률은 다음 [그림 24]와 같이 추정되었는데, **분석대상지역의 경우 지진규모 6.0에서는 피해의 발생이 미미하나, 규모 6.4 또는 6.8에서의 경우 특히 345kV 변전소가 평균적으로 가장 취약할 것으로 예상**되었음.



[그림 24] 지진 규모에 따른 라이프라인 단일 구성요소 피해 발생 확률

[표 14] 본 연구가 제안한 지진 취약도 평가모듈과 경주, 포항지진의 비교

분류			최대지반가속도 (g)		비고
			2016 경주지진 (M=5.5)	2017 포항지진 (M=5.4)	
발전소	1	한울	0.014	0.013	
	2	예천	0.017	0.013	
	3	안동	0.021	0.016	
	4	청송	0.034	0.038	
	5	월성	**0.117**	0.038	경주지진 당시 원전 1~4호기 수동정지
	6	신월성	**0.116**	0.039	
345kV 변전소	7	신영주	0.018	0.014	
	8	선산	0.031	0.019	
	9	신영일	0.077	**0.215**	포항지진 당시 흥해변전소(154kV) 2변압기 고장
	10	포스코	0.090	**0.204**	포항공대로 연결된 154kV 선로 보호계전기 작동으로 일시 운영 중단
	11	신포항	0.107	0.119	
	12	북대구	0.042	0.021	
	13	고령	0.034	0.016	
	14	대구	0.055	0.021	
	15	신경산	0.061	0.025	
	16	울주	0.286	0.034	
	17	북경남	0.041	0.016	
정수장	W1	공산	0.045	0.022	
	W2	문산	0.035	0.017	
	W3	매곡	0.036	0.017	
	W4	고산	0.056	0.023	

- 이와 같은 본 연구의 분석 결과는 [표 14]와 같이 개별 구성요소 위치와 최대지반가속도를 고려한 구체적인 라이프라인 거점시설별 지진피해예측값으로도 나타낼 수 있는데, 대부분의 구성요소가 지난 경주, 포항지진에 대하여 손상없음(d1) 단계에 속하는 것을 확인할 수 있음.
- 뿐만 아니라 본 연구에서 2016년 경주지진 사례와 동일한 조건으로 시뮬레이션을 수행하여 **최대지반가속도 0.1g이상이 예측된 월성 및 신월성 발전소의 경우 실제로도 당시 원전 1~4호기가 정밀 안전점검을 위하여 수동 정지**하였었음.
- 또한 345kV 변전소의 경우 포항지진의 사례로 분석하였을 때 **신영일 변전소와 포스코 변전소에서 0.2g이상의 최대지반가속도 값이 예측**되었는데, 이 역시 2017년 포항지진 당시 신영일변전소 인근에 위치한 154kV 흥해 변전소의 변압기 고장으로 정전이 발생한 사례와 포스코 변전소가 관리하고 있는 연결선로 내 보호계전기 작동으로 인해 일시 운영 중단된 사례와 일치하였음.

다. 라이프라인 시스템 네트워크 지진재해 기능저하 예측 모델

❑ 라이프라인 네트워크 피해파급의 베이지안 모형

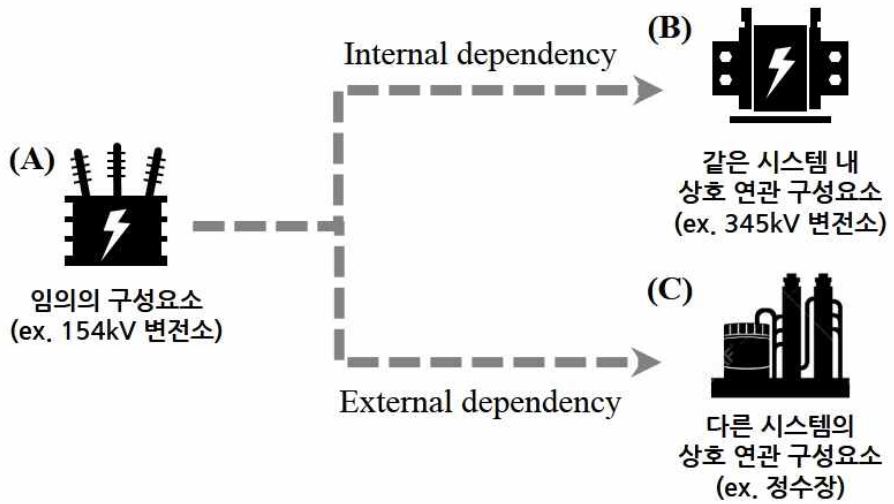
1) 개발 개요

- 다음의 [표 15]는 일본의 1995년 고베지진과 2004년 니가타 중부 현 지진 당시 하나의 라이프라인시스템 피해가 해당 시스템에서 제공하는 서비스(예: 전기, 수도)를 활용하는 다른 라이프라인시스템(예: 통신시설, 의료시설 등)으로 파급된 사례를 나타냄.

[표 15] 일본 지진 당시 라이프라인 시스템 간 피해파급 사례 (Tsuruta et al., 2008)

라이프라인 시스템	고베 지진 (1995년 1월 17일)		니가타 중부 현 지진 (2004년 10월 23일)	
	다른 시스템에게 피해파급 건수	다른 시스템으로부터 피해파급 건수	다른 시스템에게 피해파급 건수	다른 시스템으로부터 피해파급 건수
전력	21	6	29	8
상수도	16	8	7	6
하수처리	1	16	4	12
가스	2	13	1	6
통신	18	15	16	12
도로	38	7	24	14
교통	1	13	0	9
기타 (금융, 의료)	30	49	8	22
총계	127		89	

- 이와 같이 <u>라이프라인시스템을 구성하는 임의의 거점시설의 피해가 같은 시스템 또는 다른 시스템의 거점시설의 작동에 영향을 주거나 받는 양방향의 관계일 때, 둘은 상호 의존</u>한다고 할 수 있음(Rinaldi 2001).
- 특히 본 연구에서는 두 거점시설이 물리적으로 연결되어 있고 하나의 산출물이 다른 것의 기능 수행을 위한 투입물이 될 때 의존한다고 정의하며, <u>이때 A에 대한 B의 의존도($Dependency_{BA}$)값은 연결된 모든 상위노드로부터의 투입물 총량 대비 A로부터의 투입물량의 값으로 정의</u>함.



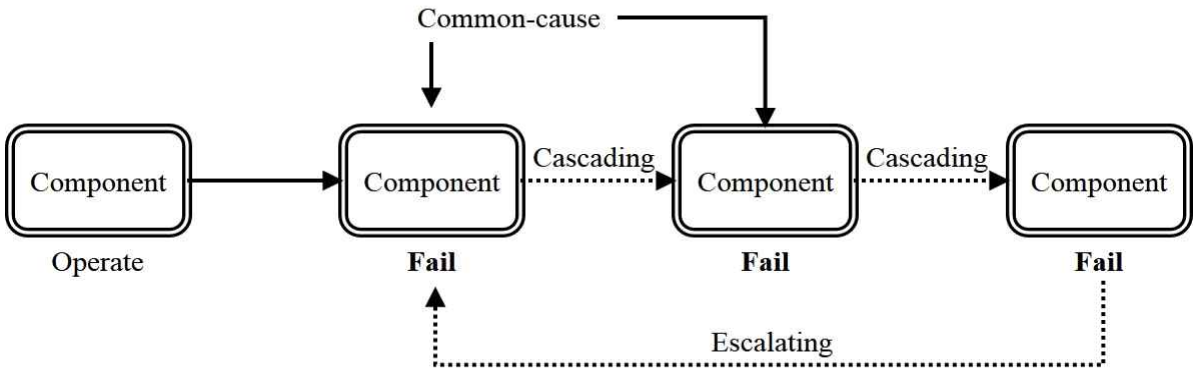
[그림 25] 라이프라인 구성요소 간 상호의존도 도식화

$$\text{Dependency}_{\text{BA}} = \frac{\in\text{put from A}}{\sum_i \in\text{put from } i} \; (i = \text{connected node}) \qquad \text{(식 5)}$$

- 따라서 의존도가 높은 상위노드가 피해를 입을 경우 그 피해가 전파될 수 있으며, 이러한 라이프라인시스템 피해파급을 정량화하기 위하여 본 연구는 관측 또는 비교적 신뢰도 높은 예측을 기반으로 발생확률을 알 수 있는 사건과 불확실성이 포함된 사건의 인과관계를 도식화하여 불확실성이 포함된 사건의 발생확률을 추론할 수 있게 하는 베이지안 모형을 활용하여 라이프라인시스템의 피해파급을 분석함.
- 베이지안의 관점에 의하면 베이지안 모형은 초기 발현된 사건이 전체 시스템으로 파급되는 확률을 예측할 수 있게 하며 특히 라이프라인 네트워크 지진 피해 예측과 같이 통계적 데이터의 취득이 어려운 분야에 용이하게 사용될 수 있음.

2) 개발 결과

- <u>라이프라인 시스템의 기능 유지 관점에서 피해란 다음의 세 가지로 분류</u>할 수 있음. (Rinaldi et al., 2001)
  a. <u>공통원인피해(Common-cause failure)</u>: 하나의 공통원인으로 인하여 둘 또는 그 이상의 구성요소가 동시에 혹은 짧은 간격으로 고장 상태에 이르는 피해를 의미하며, 이때 구성요소 간 공통원인피해는 독립적으로 발생함.
  b. <u>연쇄피해(Cascading failure)</u>: 특정 구성요소의 국부 고장으로 인하여 해당 요소와 상호 연결된 동일 혹은 외부 시스템의 다른 요소가 기능 저하되는 피해를 의미하며, 상위 고장요소에 대한 조건부 확률로 발생함.
  c. <u>증폭피해(Escalating failure)</u>: 공통원인피해나 연쇄피해로 인하여 이미 기능저하에 이른 구성요소가 추가적인 외부 환경에 의하여 그 기능이 악화되거나 본래의 기능 수준으로 회복이 더뎌지는 피해를 의미하며, 외부 환경 요소에 대한 조건부 확률로 발생함.



[그림 26] 라이프라인 시스템 내 세 가지 피해유형

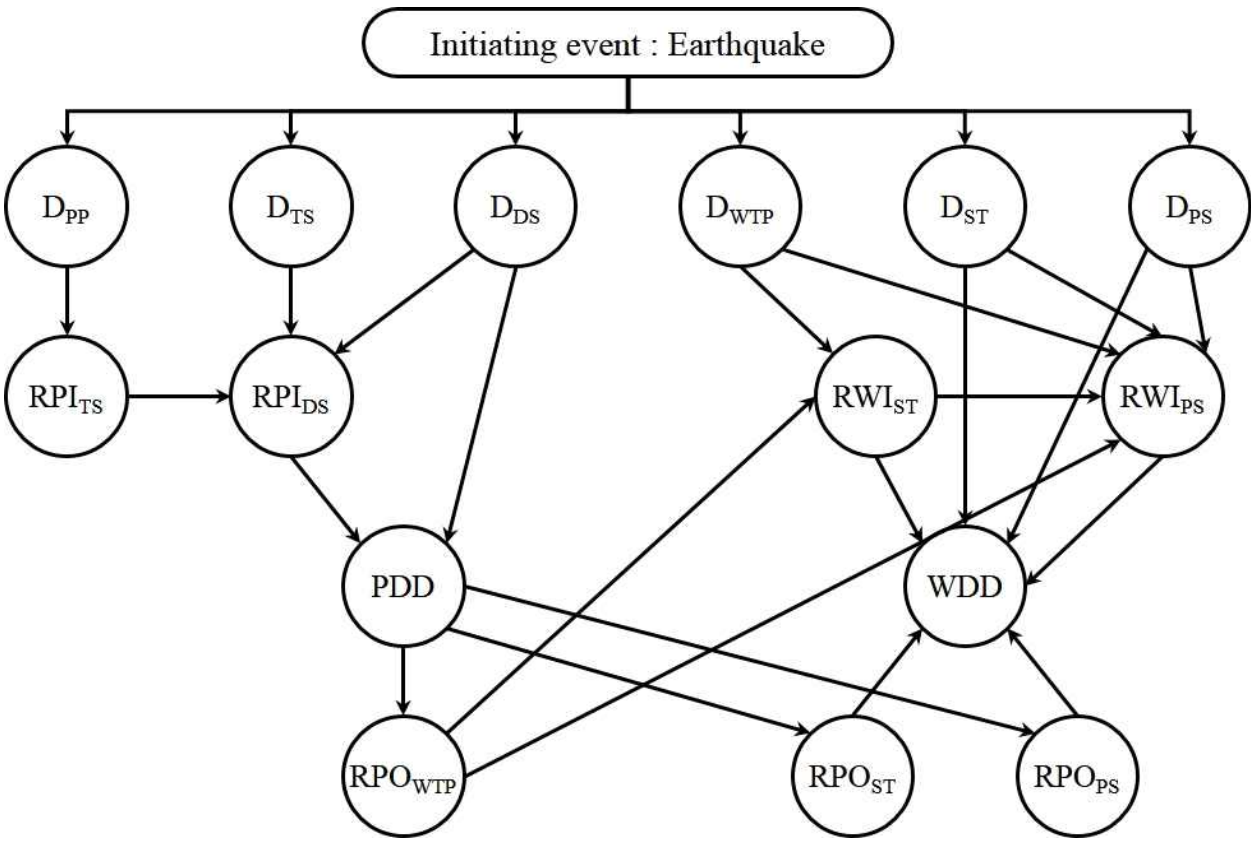
- 즉 각각의 공통원인피해, 연쇄피해, 증폭피해가 라이프라인 시스템의 기능저하를 유발하는 독립 사건이 되며, 그 발생확률은 사건의 인과관계에 기인하여 추론할 수 있음.

- 따라서 본 연구에서는 **라이프라인 시스템의 전력 및 상수도 네트워크에 대하여 기능저하를 유발시킬 수 있는 사건을 다음의 총 16가지로 분류**하고, 각 사건 간 인과관계를 도식화하는 베이지안 모형을 바탕으로 지진의 규모에 따른 전력 분배 감소와 상수 분배 감소를 예측하고자 하였음.

1. 지진의 규모 (Earthquake moment magnitude, M)
2. 발전소의 물리적 파괴 (Destruction of power plant, D_{PP})
3. 송전변전소의 물리적 파괴 (Destruction of transmission substation, D_{TS})
4. 배전변전소의 물리적 파괴 (Destruction of distribution substation, D_{DS})
5. 송전변전소로의 전력 유입 감소 (Reduction of power inflow to transmission substation, RPI_{TS}))
6. 배전변전소로의 전력 유입 감소 (Reduction of power inflow to distribution substation, RPI_{DS}))
7. 전력 분배 감소 (Power distribution disruption, PDD)
8. 정수장의 물리적 파괴 (Destruction of water treatment plant, D_{WTP})
9. 저수탱크의 물리적 파괴 (Destruction of storage tank, D_{ST})
10. 가압장의 물리적 파괴 (Destruction of pumping station, D_{PP})
11. 저수탱크로의 상수 유입 감소 (Reduction of water inflow to storage tank, RWI_{ST})
12. 가압장으로의 상수 유입 감소 (Reduction of water inflow to pumping station, RWI_{PS})
13. 정수장 가동을 위한 전력 유입 감소 (Reduction of power distribution for water treatment plant operation, RPO_{WTP})
14. 저수탱크 가동을 위한 전력 유입 감소 (Reduction of power distribution for storage tank operation, RPO_{ST})
15. 가압장 가동을 위한 전력 유입 감소 (Reduction of power distribution for pumping station operation, RPO_{PS})
16. 상수 분배 감소 (Water distribution disruption, WDD)

- 본 연구에서 **공통원인피해를 유발시키는 초기사건은 지진(사건 1)**이며, 가장 먼저 지반 거동으로 인한 **개별 구성요소의 물리적 손상(사건 2, 3, 4, 8, 9, 10)이 공통원인피해**로 나타남.
- 이때 각 구성요소의 공통원인피해 발생 확률은 앞서 기술한 핵심연구성과 중 하나인 “라이프라인 시스템 구성요소 지진 취약도 평가 모듈”을 통해 추정할 수 있음.
- 다음으로 발전소, 변전소의 물리적 손상은 전력 시스템 내부에서는 **하위 변전소로의 전력 흐름을 감소(사건 5, 6)**시키게 되며, 이로 인해 진원으로부터 지리적으로 먼 곳에 위치하여 공통원인피해가 발생하지 않은 변전소일지라도 공급계통 고장으로 인한 연쇄피해를 겪을 수 있음. 특히 상위 연결노드에 대한 의존도(식 5)가 높을수록 연쇄피해 발생 확률은 높아짐.

- 상수도 시스템의 연쇄피해는 전력 시스템과 마찬가지로 **정수장의 물리적 손상으로 인한 상수 유입의 감소(사건 11, 12)**로 나타날 수 있음.
- 더하여 상수도 시스템의 경우 **전력 시스템으로부터 기인하는 시스템 작동을 위한 전력 수급의 감소(사건 13, 14, 15)가 연쇄피해로써 발생할 수 있음**.
- [그림27]은 지금까지 기술한 라이프라인 네트워크의 피해파급을 도식화한 베이지안 모형으로, 연결된 사건은 피해파급의 경로를 나타내며 **본 모형의 최종목적은 전력 분배 감소(사건 7) 또는 상수 분배 감소 (사건 16)의 사후확률을 추정하는 것**임.
- 이때 지속적인 피해 누적으로 인해 가압장의 상수 확보량이 충분하지 않을 경우 발전소나 변전소의 기계 작동 시 필요한 냉각수 공급 감소(Reduction of cooling water, RCW)가 발생할 수 있으며 이로 인해 전력 흐름 감소가 지속되거나 상수를 필요로 하는 복구 작업에 지연을 유발하는 증폭피해가 야기될 수 있음.
- 그러나 국내의 경우 원자력발전소가 대부분 해안가에 위치하여 냉각수 공급이 자력으로 가능하고, 본 연구에서 지진 직후 발생 가능한 피해를 공통원인피해와 연쇄피해로 한정하였기 때문에 냉각수 공급량 저하의 발생 확률은 0으로 가정함.



[그림 27] 본 연구의 베이지안 모형 도식화

- 한편 베이지안 모형에서 초기사건에 의해 발현되는 사건은 부모 노드로 정의되며 독립적으로 발생할 사전확률 값만을 갖는다. 그 외의 모든 사건들은 사전확률과 함께 부모 노드의 발생에 따른 조건부 확률 값을 가짐.
- 구체적으로는 사전확률로 사후확률을 추정하는 식 6의 베이즈 정리(Bayes'theorem)를 통해 x_1부터 x_n까지 총 n개의 노드를 갖는 베이지안 모형의 사후확률을 추정할 수 있음.

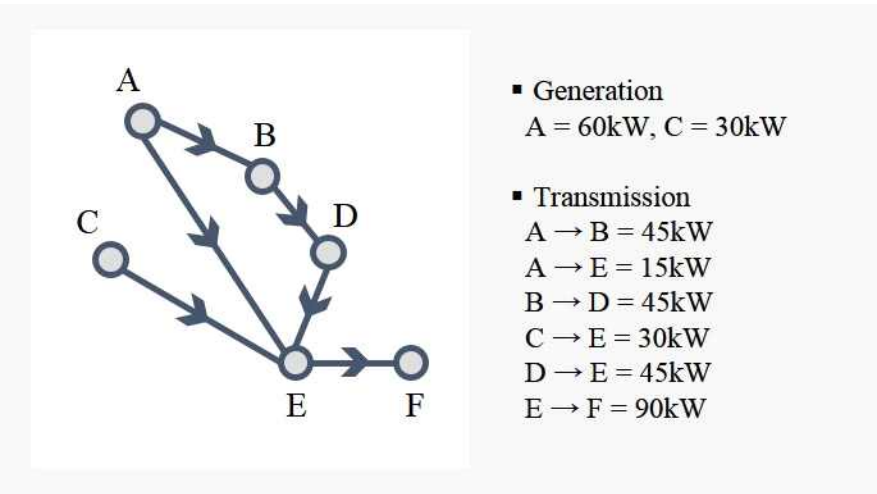
$$P(V) = \prod_i P(x_i \mid \mathrm{Parent}(x_i)) \qquad \text{(식 6)}$$

- 따라서 <u>본 연구 모형의 도식을 식 6에 적용하면 해당 전력, 상수도 네트워크의 기능저하 사후확률을 추정</u>할 수 있으며 상세 내용은 각각 다음 식 7, 8과 같음.

$$\begin{aligned} P(\mathrm{PDD}) &= P(\mathrm{E_M}, \mathrm{D_{TS}}, \mathrm{D_{DS}}, \mathrm{RPI_{DS}}) \\ &= P(\mathrm{D_{TS}} \mid \mathrm{E_M}) \times P(\mathrm{D_{DS}} \mid \mathrm{E_M}) \times P(\mathrm{RPI_{DS}} \mid \mathrm{D_{TS}}, \mathrm{D_{DS}}) \end{aligned} \qquad \text{(식 7)}$$

$$\begin{aligned} P(\mathrm{WDD}) &= P(\mathrm{E_M}, \mathrm{D_{WTP}}, \mathrm{D_{ST}}, \mathrm{D_{PS}}, \mathrm{RPO_{WTP}}, \mathrm{RWI_{ST}}, \mathrm{RWI_{PS}}) \\ &= P(\mathrm{D_{WTP}} \mid \mathrm{E_M}) \times P(\mathrm{D_{ST}} \mid \mathrm{E_M}) \times P(\mathrm{D_{PS}} \mid \mathrm{E_M}) \\ &\quad \times P(\mathrm{RPO_{WTP}} \mid \mathrm{PDD}) \times P(\mathrm{RWI_{ST}} \mid \mathrm{D_{WTP}}, \mathrm{RPO_{WTP}}) \\ &\quad \times P(\mathrm{RWI_{PS}} \mid \mathrm{D_{WTP}}, \mathrm{D_{ST}}, \mathrm{D_{PS}}, \mathrm{RWI_{ST}}, \mathrm{RPO_{WTP}}) \end{aligned} \qquad \text{(식 8)}$$

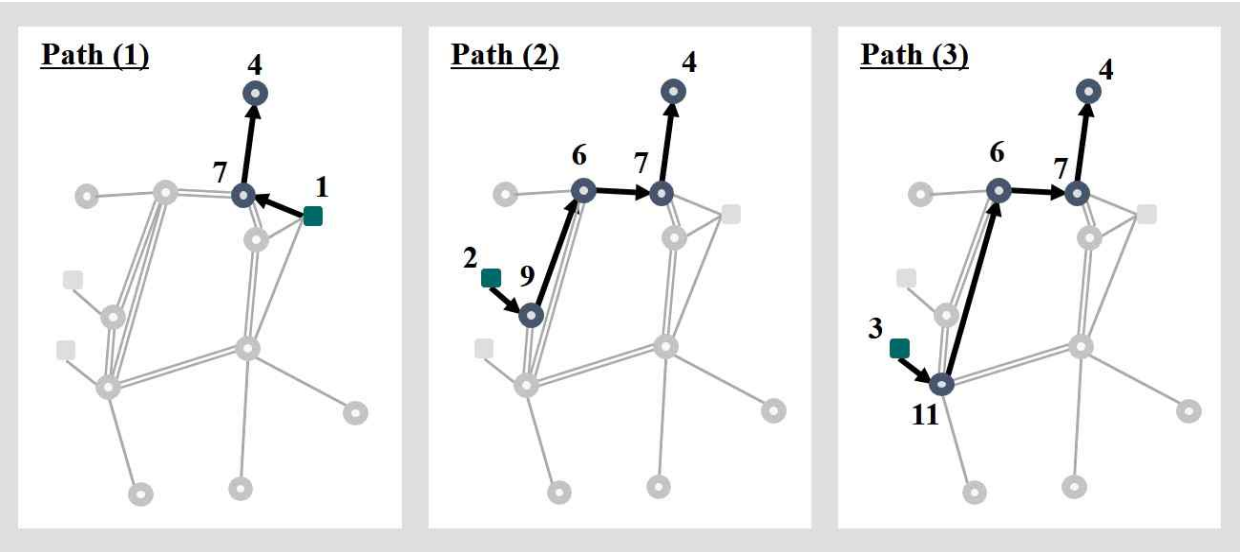
- 위 식에서 전력 및 상수도 네트워크의 연쇄피해항목(RPI, RWI, RPO)을 구하기 위해서는 각 노드들 간 상호의존도를 알아야 함. 이때 특정 노드의 의존도는 앞서 정의한 것과 같이 상위노드로부터 전달되는 투입물량에 비례함.
- 예를 들어, 아래 [그림 28]과 같이 부모노드 A, C에서 생산된 전기가 연결 경로에 따라 최종적으로 F까지 전달되는 네트워크의 경우, 자식노드 B는 A에 D는 B에, E는 A, C, D에 F는 E에 의존한다고 할 수 있음.



[그림 28] 네트워크 구성요소 간 상호의존도 예시 (투입물량)

- 이때 3개의 상위노드 A, C, D에 의존하는 노드 E의 투입물 총량은 90kW이고 그 중 45kW 만큼을 노드 D에서 전달 받고 있으므로 D에 대한 E의 의존도는 0.5임.
- 그러나 **일반적으로 라이프라인 구성요소의 경우 공급 연결망 및 공급양이 국가 보안의 문제로 공개되지 않음**. 이러한 이유로 본 연구에서는 개별 구성요소의 초기 설정 용량을 넘지 않는 한도 내에서 라이프라인 서비스가 전달되는 가능한 경로 중 최단경로를 대표로 선정하고, **경로의 시작점이 두 군데 이상일 경우 투입값은 각 연결 경로의 거리와 반비례한다고 가정**하였음.

$$a_{ij} = \frac{\sum_k (1 / d_{ki}(j))}{\sum_k (1 / d_{ki})} \quad \forall\ i, j \qquad \text{(식 9)}$$



[그림 29] 네트워크 구성요소 간 상호의존도 예시 (연결경로 간 거리)

- 이 경우 [그림 29]와 같이 노드 4로 서비스가 전달되는 연결경로가 {1, 7, 4}, {2, 9, 6, 7, 4}, {3, 11, 6, 7, 4}의 총 세 가지이고 각 연결경로 간 거리가 8.6km, 18.7km, 22km라면 노드 4는 연결경로거리가 가장 짧은 노드 1에 대한 의존도가 가장 높으며, 특히 노드 4와 연결되는 모든 경로는 노드 7을 포함하므로 이에 대한 의존도는 1임.
- 같은 방법으로 상기 기술한 총 16가지 사건에 대한 조건부 확률을 추정할 수 있는데, 다음 [표 16]은 저수탱크의 물리적 파괴(사건 9, ds1 to ds5), 가압장의 물리적 파괴(사건 10, ds1 to ds5), 저수탱크로의 상수 유입 감소(사건 11, True or False), 가압장으로의 상수 유입 감소(사건 12, True or False)의 상태가 상수 분배 감소(사건 16, True or False)의 상태에 어떻게 영향을 주는지의 총 5×5×2×2=100가지 확률 분포를 요약 나열한 것임.
- 구체적으로, 저수탱크와 가압장으로의 상수유입감소사건이 동시에 True인 경우 저수탱크와 가압장의 물리적 파괴 사건의 상태와 상관없이 상수 분배 감소 사건은 True임.

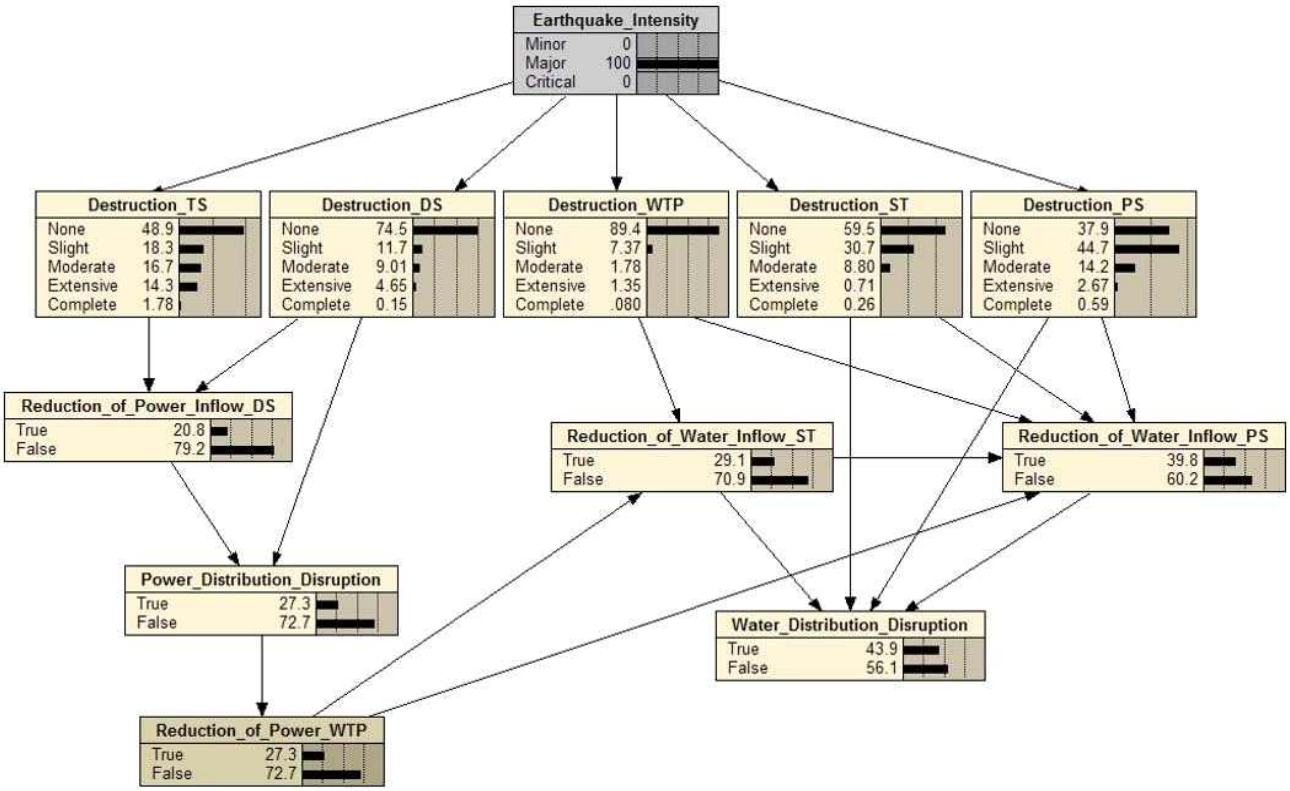
- 반면 저수탱크로의 상수유입감소만이 True이고 가압장으로의 상수유입감소는 False인 경우 상수 분배 감소 사건이 True일 확률은 가압장의 물리적 파괴 상태에 따라 최소 50.81% ([그림 30]과 같이 저수탱크에 연결되지 않은 가압장 노드 W6~W11, W14~W16, W23의 손상 이 없을 때 용량, [표 8]참고)에서 최대 100%(모든 노드 파괴)까지 변화할 수 있음.

[그림 30] 저수탱크로의 상수유입감소=True일 때 상수 흐름 예시

[표 16] 상수 분배 감소 사건 {True, False}의 조건부 확률

RWI_{ST}	RWI_{PS}	D_{ST}	D_{PS}	WDD	
				True	False
True	True	None	None	100	0
True	True	None	Slight	100	0
True	True	None	Moderate	100	0
True	True	None	Extensive	100	0
True	True	None	Complete	100	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
True	False	None	None	50.81	49.19
True	False	None	Slight	53.27	46.73
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
False	True	None	None	78.38	21.62
False	True	None	Slight	78.38	21.62
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
False	False	None	None	0	100
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
False	False	Complete	Complete	100	0

- 최종적으로 본 연구는 베이지안 네트워크 구현 및 확률 계산을 지원하는 Norsys의 Netica 소프트웨어를 활용하여 **"라이프라인 피해파급 예측을 위한 베이지안 모형" 소프트웨어 (등록번호: C-2018-040042)를 개발**하였으며, 그 대표 화면은 아래 [그림 31]과 같음.



[그림 31] 라이프라인 피해파급 예측을 위한 베이지안 모형 SW

❑ 라이프라인 네트워크 강건성 평가 모듈

1) 개발 개요

- 네트워크 강건성은 회복탄력성(Resilience)의 구성요소 중 하나로 재난과 같은 외부 환경 변화에도 불구하고 본래의 기능을 유지하는 성질을 의미함(Norris et al., 2008).
- 특히 강건성은 본 연구 [핵심성과 2]에서 제시한 서비스제공가능도가 공급자 측면의 함수인 것과 반대로 **지진 발생 직후 특정 시점에서 해당 네트워크에서 지속적으로 서비스를 받고 있는 최종 수요자의 함수 f(t) 로 표현**됨.

$$\text{Robustness} = \frac{f(t)}{F_0} \qquad \text{(식 10)}$$

- 이러한 이유로 **네트워크 강건성은 실제 지진이 발생하기 전까지는 추정에 어려움이 있으며, 불확실성 요소의 인과관계를 고려한 시스템적인 차원에서의 예측이 요구**됨.
- 이에 본 연구는 앞서 라이프라인시스템 피해파급의 불확실성을 포함하는 베이지안 모형을 작성하였으며, 베이지안의 관점에 의하면 지진으로 인한 라이프라인 시스템 피해 간 인과관계(베이지안 모형 도식화)와 각 피해의 발생확률(사전확률)을 통해 네트워크 강건성(사후 확률)의 예측이 가능함.

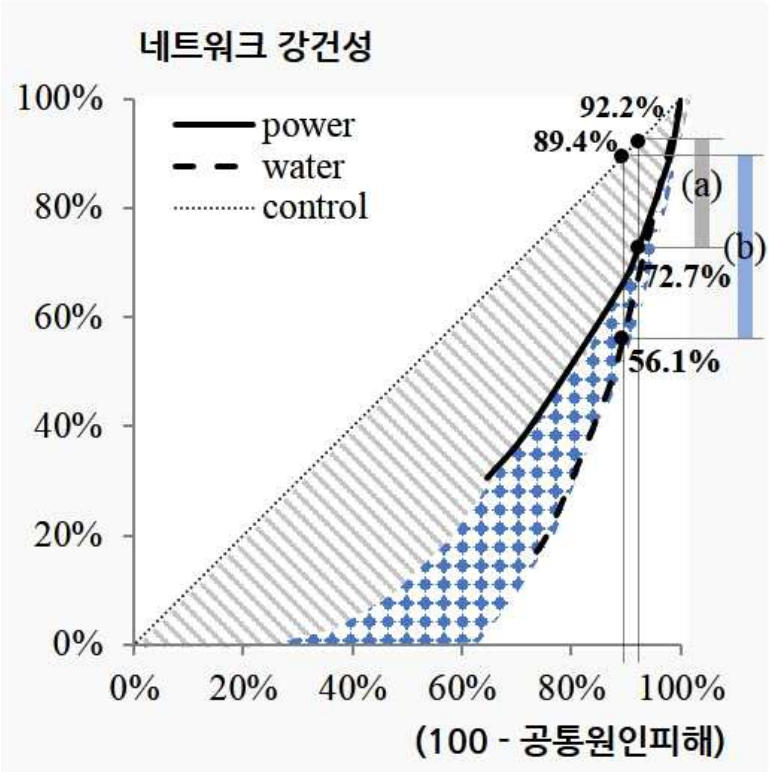
- 추가적으로 본 연구는 라이프라인시스템의 서비스제공불능도를 정량화하는데 활용되는 Haimes and Jiang(2001)의 투입-산출 불능 모형(Input-Output Inoperability Model, IIM)을 활용하여 분석대상지역의 네트워크 강건성 평가 모듈을 개발함.

$$C = (E - I)^{-1} \times F \qquad \text{(식 11)}$$

where, C = ∈operability matrix
E = Unit matrix
I = Interdependency matrix
F = ∈$ial\ failure\ matrix$

2) 개발 결과

- 최종적으로 본 연구에서 예측하고자하는 국내 대구·경북지역 전력 및 상수도 네트워크의 강건성 값은 본 연구 핵심성과인 라이프라인 시스템 구성요소 지진 취약도 평가모듈을 통해 추정할 수 있는 단일 구성요소별 공통원인피해 발생확률과, 피해파급의 베이지안 모형을 통해 추정할 수 있는 연쇄피해 발생확률을 상기 식 10에 대입함으로써 구할 수 있음.
- [그림 32]는 규모별 지진 시나리오에 따른 강건성 변화 추이와 기능저하를 연속함수로 나타낸 것으로, 구체적으로 **대구경북지역의 경우 규모 6.4(Major)의 지진이 발생하게 되면 전력시스템은 약 7.8%, 상수도시스템은 약 10.6%의 공통원인피해가 추정됨**을 알 수 있음.
- 그러나 **네트워크 강건성 측면에서 살펴보면, 실제 서비스를 받고 있는 가구는 전력의 경우 전체 고객의 약 72.7%(추가 기능저하 약 19.5%([그림 32]의 (a)), 상수의 경우 전체 고객의 약 56.1% (추가 기능저하 약 33.3%([그림 32]의 (b))에 그칠 것으로 예상됨**.



[그림 32] 지진 규모에 따른 전력 및 상수도 네트워크 강건성 예측 결과

- 즉 피해파급의 베이지안모형에서 기술한 피해 사건과 같이 다양한 종류의 연쇄 피해가 발현되어 공통원인피해만을 고려했을 때와 비교하여 전력, 상수 각각 [그림 32]의 빗금친 부분만큼의 추가 기능저하가 발생할 수 있으므로 네트워크의 강건성을 확보할 수 있는 방안을 마련해야 함.

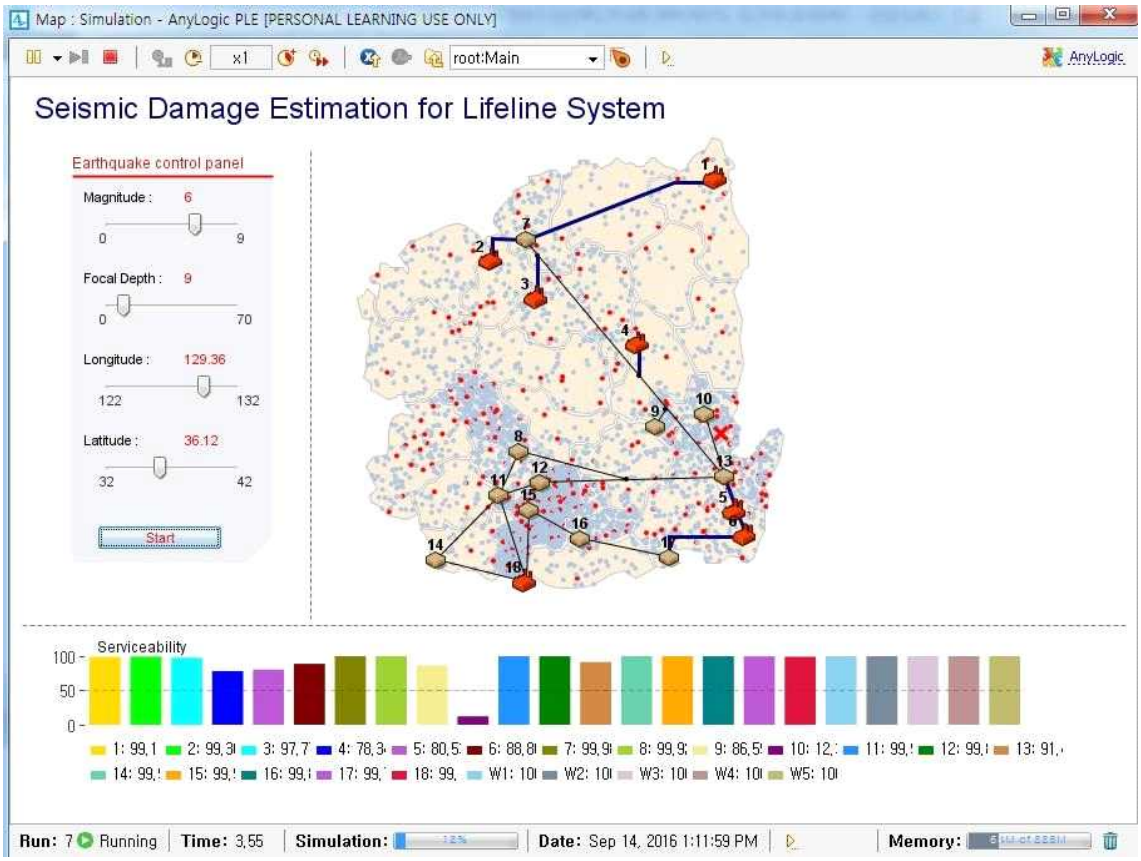
❑ 기능저하 시각화 모듈

1) 개발 개요

- 본 연구를 통해 개발될 <u>연구 성과의 활용성을 극대화하기 위해서는 라이프라인시스템 운영자 또는 지역 재난 대응 관리자와 같이 본 모델의 개발과정에 대한 배경지식이 없는 사용자일지라도 모델을 사용하고 분석 결과를 이해하는데 문제가 없도록 해야 함</u>.
- 따라서 본 단계에서는 분석하고자하는 라이프라인 네트워크의 구성 방법, 지진 시나리오 입력방법을 쉽게 따라할 수 있도록 사용자인터페이스를 구성하며, 라이프라인 거점시설 별 서비스제공가능도 및 지역별 현재 최종수요자의 서비스 공급을 막대그래프, 분포도 등으로 나타내는 기능 저하 시각화 모듈을 개발함.

2) 개발 결과

- [그림 33]은 본 연구가 개발한 라이프라인시스템 기능저하 시각화 모듈의 예시화면으로, 본 시각화 모듈은 앞서 Anylogic 및 Tableau 소프트웨어를 기반으로 개발된 국내 주요 라이프라인 시스템 네트워크 지도와 함께 연동됨.



[그림 33] 라이프라인 네트워크 기능저하 시각화 모듈의 예시

- 보다 구체적으로 살펴보면, 상단 왼쪽의 패널을 통해 사용자는 분석하고자 하는 지진의 규모, 진원 깊이, 진원지 위도, 경도 등을 입력할 수 있으며 시작 버튼을 누름과 동시에 해당 지진에 대한 분석이 수행됨.
- 이때 하단의 막대그래프는 재난 이전 보통의 상태에서의 라이프 라인 거점시설 별 서비스 공급량을 100%로 기준하여 지진 이후 라이프라인시스템의 서비스제공가능도를 추정한 것으로 예시의 지진 시나리오의 경우 10번 거점시설에 큰 피해가 발생한 것을 확인할 수 있음.
- 또한 최종수요자의 서비스 공급 현황은 최종 수요자 500가구를 나타내는 작은 원의 색상 변화로써 표현되는데 하늘색 동그라미의 경우 현재 서비스 공급 중인 최종수요자, 빨간색 동그라미의 경우 서비스 공급이 중단된 최종수요자로 구분됨.

❑ 개발 모델의 검증방안

1) 개발 개요

- 본 연구는 지진에 대한 **피해 사례 및 이력 데이터가 미비한 국내를 대상으로 전력 및 네트워크의 강건성을 추정하고 있기 때문에, 연구 수행 결과를 실제 사례와 비교하여 오차율을 검정하는 정량적인 검증을 수행하는데 한계**가 있음.
- 이에 대한 보완방안으로 본 연구진은 연구 1, 2차년도에서 각각 건설관리 및 원자력 연구 분야 전문가 5인을 대상으로 적정성 평가를 수행하였으며, 전문가 모두에게 연구결과가 논리적으로 적정하다는 평가를 받았음.
- 추가적으로 본 단계에서는 **본 연구진이 기 수행한 "분산형 시뮬레이션 기반 시설물 재난 대응 및 관리시스템 구축"연구에서 개발된 시뮬레이션 모델 테스트 및 검증방법을 본 연구에 적용하여 개발 모델의 정량적, 정성적 검증을 수행**함.

2) 개발 결과

- 본 연구와 같이 모의 재현 및 실험에 어려움이 있는 재해 예측 및 진단 연구의 경우 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 통해 관심 대상과 유사하게 행동하는 가상의 시스템을 생성하여 연구 분석을 수행하는데 이러한 모의 시스템을 모델이라 함.
- 시뮬레이션을 활용한 연구 단계는 크게 1)문제 발견 및 방향 설정, 2)모델 개발, 3) 모델 구동 및 분석, 4)실행 단계로 나눌 수 있으며, 이에 대한 상세한 설명은 다음과 같음 (Banks et al. 2005).

1-1) Problem formulation (문제 정의)

모든 연구는 문제 제기 및 문제 정의로부터 시작되며, 정책 결정자와 모델러 간 문제에 대한 상호 이해 및 동의를 통해 이루어짐.

1-2) Setting of objectives and overall project plan (목표설정 및 연구계획)

시뮬레이션 연구 목적은 "분석을 통해 해결하고자 하는 문제에 대한 질문"으로 정의할 수 있음. 본 단계에서는 시뮬레이션이 문제 해결에 적합한 방법인지 판단해야 하며, 시뮬레이션 적용의 적합성을 도출한 이후에는 시뮬레이션의 전반적인 연구 계획 수립이 이루어져야 함.

2-1) Model conceptualization (모델 개발)
연구의 목표 및 방향이 설정된 이후에는 모델의 개념화, 또는 개념 모델 구축이 이루어져야 하며, 이는 제시한 문제의 주요 특성에 대한 추상화, 시스템을 모델링하기 위한 기본 가정의 설정, 그리고 개념모델의 지속적인 수정과정이 요구됨.

2-2) Data collection (데이터 수집)
모델 개발은 모델에서 활용되는 데이터 수집 과정과 상호적으로 이루어져야 함. 데이터 수집은 시뮬레이션 연구에 중요한 부분이기 때문에 모델 개발 초기 단계에 이루어져야 함.

3-1) Model translation (컴퓨터 시뮬레이션 모델 구축)
현실세계의 시스템을 모델링 하는 것은 방대한 양의 정보와 연산을 요구하기 때문에 이는 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 프로그램 언어로 변환되어야 함.

3-2) Verified (모델 검사)
모델 검사는 컴퓨터를 통해 구현된 시뮬레이션 소프트웨어 또는 프로그램이 명세서 또는 개념모델과 같이 구현되었는지 확인하는 단계임. 즉, 모델러가 개발하고자 하는 모델의 논리적 구조들이 컴퓨터에서 올바르게 코드화 되었는지 확인하는 것임.

3-3) Validated (타당성 검증)
타당성 검증은 개발된 시뮬레이션 모델이 현실세계를 올바르게 반영하는지 판단하는 것으로, 모델 캘리브레이션(변수조정) 과정과 병행되며, 현실세계의 현상과 모델 분석 결과를 비교함으로써 수행함.

3-4) Experimental design (실험설계)
시뮬레이션 모델 분석 전에 시뮬레이션을 위한 대안들이 사전에 결정되어야 함. 이는 문제 해결을 위해 어떤 대안들이 분석되어야 할지에 대한 고민을 통해 이루어 짐. 뿐만 아니라, 시뮬레이션 기간, 횟수 등이 사전에 결정되어야 함.

3-5) Production runs and analysis (분석 및 분석 추가수행여부 결정)
본 단계는 분석하고자 하는 대안들에 따라 시스템의 성능 또는 결과를 측정하는 단계이며, 모델 결과에 따라 추가적인 분석 및 실험이 요구되는지를 판단함.

3-6) Documentation and reporting (문서화 및 진도보고)
본 단계는 향후 모델 분석을 재 수행 하거나, 모델을 변경하여 분석할 필요성이 있을 때를 대비하여 프로그램 및 모델링 과정에 대한 문서화를 수행하는 단계로, 개발 모델이 초기에 해결하고자 하는 문제 해결에 적합한 방향으로 진행되고 있는지를 지속적으로 확인함.

4-1) Implementation (실행 및 적용)
앞서 시뮬레이션 연구를 위한 11단계가 올바르게 수행된 경우, 본 분석결과는 앞서 제시한 문제 해결에 적용될 수 있음.

- 즉 시뮬레이션 모델 결과의 신뢰성은 모델을 올바르게 만들었는지 확인하는 Verified (모델 검사)단계와 올바른 모델을 만들었는지 확인하는 Validated (타당성 검증) 단계를 통해 확보될 수 있음.
- 이때 전자의 경우 **개념모델과 컴퓨터로 이를 구현한 시뮬레이션 모델을 비교하는 것**으로 컴퓨터 코드가 개념모델의 논리적 구조 및 입력변수들을 올바르게 표현했는지 판단하며 주로 **모델 개발자 이외의 사람(전문가)로부터의 적정성 평가 또는 다양한 입력값을 설정 후 모델의 결과 값을 분석하는 방법을 활용하여 수행**됨.
- 반면 후자의 경우 **구현된 모델이 현실세계의 현상 및 행동을 정확하게 반영하는지 확인하는 것**으로, **통계적 방법론을 이용하여 과거의 실제 데이터와 예측 데이터 등 두 종류 이상의 데이터 집합을 비교**하는 것이 이상적이나, 이러한 비교가 불가능한 경우 **실제 사용자를 대상으로 모델 결과에 대한 타당성 검토를 수행하여 대체함.**
- 따라서 이를 본 연구 개발 모델의 각 하위 모듈에 적용하면 최종적으로 다음 [표 17]과 같으며, 적정성 평가 및 타당성 평가의 상세 내용은 다음 절에서 기술함.

[표 17] 본 연구 개발 모델의 하위 모듈 요약 및 단계별 검증방안

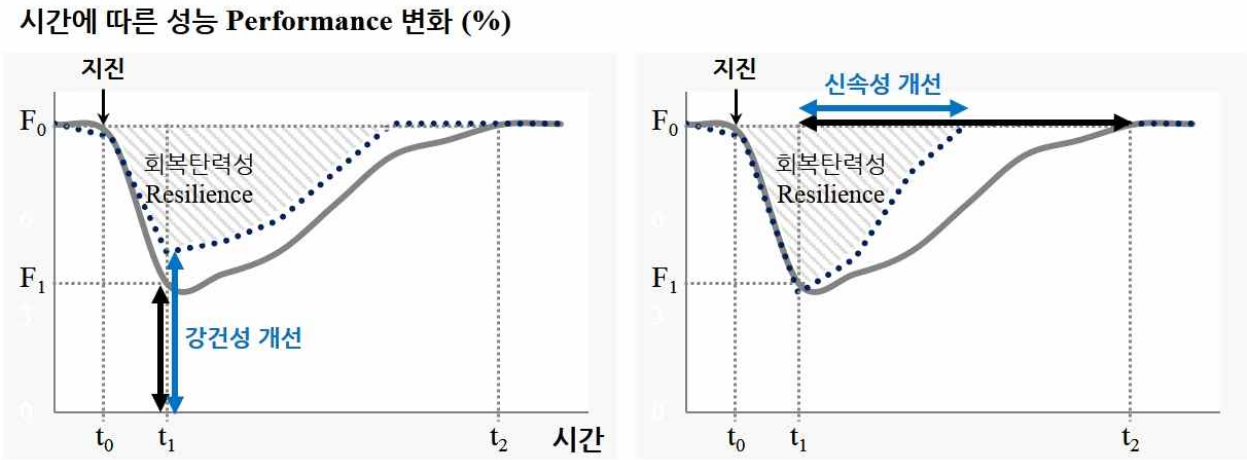
구분	예측 대상	고려사항	모델 검사 방안 (Verified)	타당성 검증 방안 (Validated)
지진 규모별 최대지반가속도 감쇠함수	최대지반 가속도 (g)	▪ 거리에 따른 지진동 감쇠	▪ 전문가(원자력 연구원 책임급 1인) 적정성 평가 ▪ 거리에 따른 최대지반가속도 감쇠 확인	▪ 사용자(한국전력 대리급 1인) 타당성 평가 ▪ 2016 경주지진 당시 관측소 계측값과의 비교
라이프라인 단일 구성요소의 손실예측함수	공통원인 피해 (%)	▪ 구성요소 위치, 구조, 용량 등 ▪ 지진취약도	▪ 전문가(건축 및 도시 관련학과 교수 5인) 적정성 평가 ▪ 최대지반가속도에 따른 공통원인 피해 증가 확인	▪ 사용자(한국전력 대리급 1인) 타당성 평가 ▪ 2016 경주지진, 2017 포항지진 피해 사례와의 비교
라이프라인 네트워크 피해파급의 베이지안 모형	연쇄피해 (%)	▪ 네트워크 연결 정보 ▪ 구성요소 간 상호의존성	▪ 전문가(건축 및 도시 관련학과 교수 5인) 적정성 평가 ▪ 상호의존성에 따른 연쇄피해 증가 확인	▪ 사용자(포스코건설 부장급 1인) 타당성 평가
라이프라인 네트워크 강건성 평가 모듈	강건성 (%)	▪ 서비스 수요	▪ 전문가(건축 및 도시 관련학과 교수 5인) 적정성 평가 ▪ 공통원인피해 및 연쇄피해에 따른 강건성 저하 확인	▪ 사용자(포스코건설 부장급 1인) 타당성 평가

라. 라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책

❑ 개발 모델을 활용한 라이프라인 네트워크 회복탄력성 확보방안

1) 개발 개요

- 본 연구 수행에 대한 전문가 적정성 평가 결과에 따르면, 본 연구는 라이프라인 피해파급의 인과관계에 따른 연쇄 피해를 예측하는 것을 주목적으로 하고 있기 때문에, **불확실성이 높은 지진에 대하여 신뢰도 높은 예측 값을 도출하고자 노력하는 것 보다는 본 연구를 활용하여 피해 파급을 완화시키는 대책을 제안하는 것이 연구의 기여도를 높일 수 있는 방안임**.
- 보다 구체적으로, 라이프라인 네트워크의 강건성(Robustness)은 면진장치와 같이 구조물이 받는 지진 에너지를 감소시키는 방법뿐만 아니라, 네트워크의 연결방식(Topology) 분산화 및 모듈화를 통해 특정 노드 장애 발생 시 우회 경로를 탐색하는 등으로 확보할 수 있음.
- 또한 유사시에 활용 가능 백업 시스템을 구축하거나 적절한 복구 자원을 확보하는 것을 통해 네트워크 회복의 신속성(Rapidity)를 높일 수 있음.
- 즉 물리적으로 같은 조건의 지진에 대하여 지진 발생 이전에 어떠한 대응 전략을 구축해놓았는가가 네트워크의 회복탄력성(Resilience)을 결정짓는 중요 척도가 됨.
- 따라서 본 단계에서는 라이프라인 시스템 지진재해 완화대책으로 **네트워크 연결방식을 변경하여 강건성을 높이는 방안**과, 적절한 복구 계획 수립을 지원하여 **복구완료시점까지의 기간인 신속성을 단축하는 방안을 제시**함.

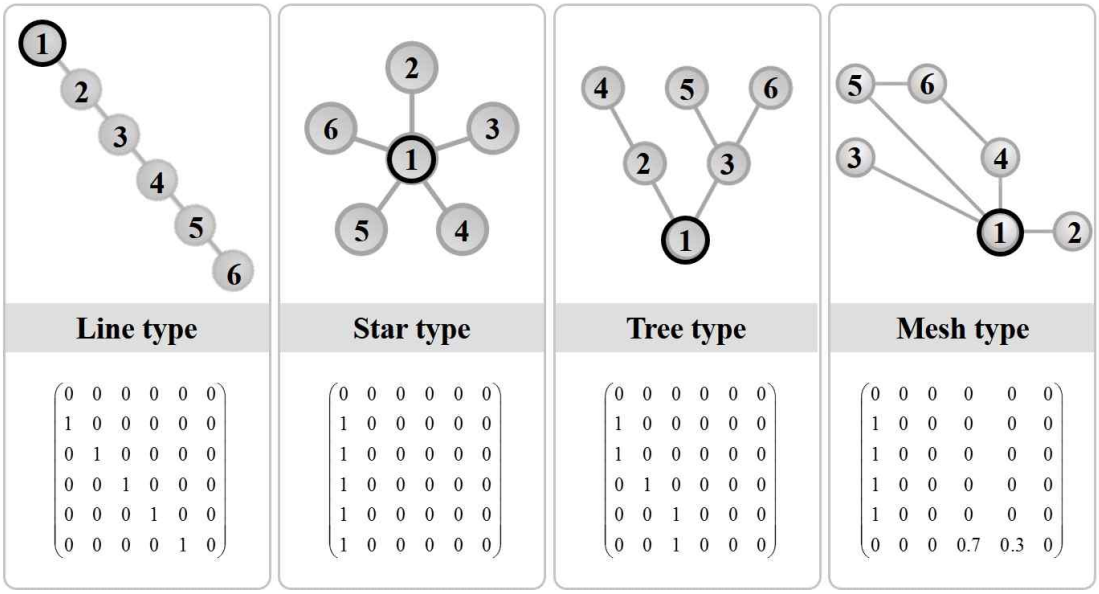


[그림 34] 라이프라인 네트워크 회복탄력성 확보 방안

2) 개발 결과

- 라이프라인 네트워크의 강건성은 개별 구성요소의 내진성능을 증진시켜 공통원인피해의 발생을 완화시킴으로써 개선할 수 있음. 예를 들어, 2017년 한국수력원자력에서는 현재 규모 6.5의 지진까지 견딜 수 있도록 설계된 국내 원자력발전소를 차례로 보강하여 규모 7.0의 지진까지 견딜 수 있도록 추진 중이라 발표하였음.
- 그러나 이러한 원전 안전 투자 확대에 따른 예산액은 2018년 10억 원, 2019년 74억 원으로 154kV 변전소나 가압장과 같은 라이프라인 네트워크의 말단 구성요소에는 적용하기 어려운 보완 방안임.

- 이에 본 연구에서는 기존의 <u>구조적인 내진 보강과 병행하여 적용하며, 비교적 적은 투자 금액으로 내진성능을 확보할 수 있도록 라이프라인 네트워크 연결방식에 따른 강건성을 비교</u>함으로써 같은 규모의 지진에 대한 연쇄 피해파급을 줄이는 방안을 제시함.



[그림 35] 라이프라인 네트워크 연결방식 예시

- [그림 35]는 총 6개의 구성요소를 갖는 네트워크의 예시로 각 구성요소 간 연결방식에 따라 선형, 별형, 나무형, 메시)형 연결방식으로 구분됨.

1) 선(Line)형 연결방식 : 네트워크 내 모든 구성요소가 하나의 회선으로 연결됨.
2) 별(Star)형 연결방식 : 네트워크 내 모든 구성요소가 중앙노드에 연결됨.
3) 나무(Tree)형 연결방식 : 네트워크 부모 노드가 두 개 이상의 자식 노드에 연결됨.
4) 메시(Mesh)형 연결방식 : 네트워크 내 임의의 노드가 다른 노드에 연결됨.

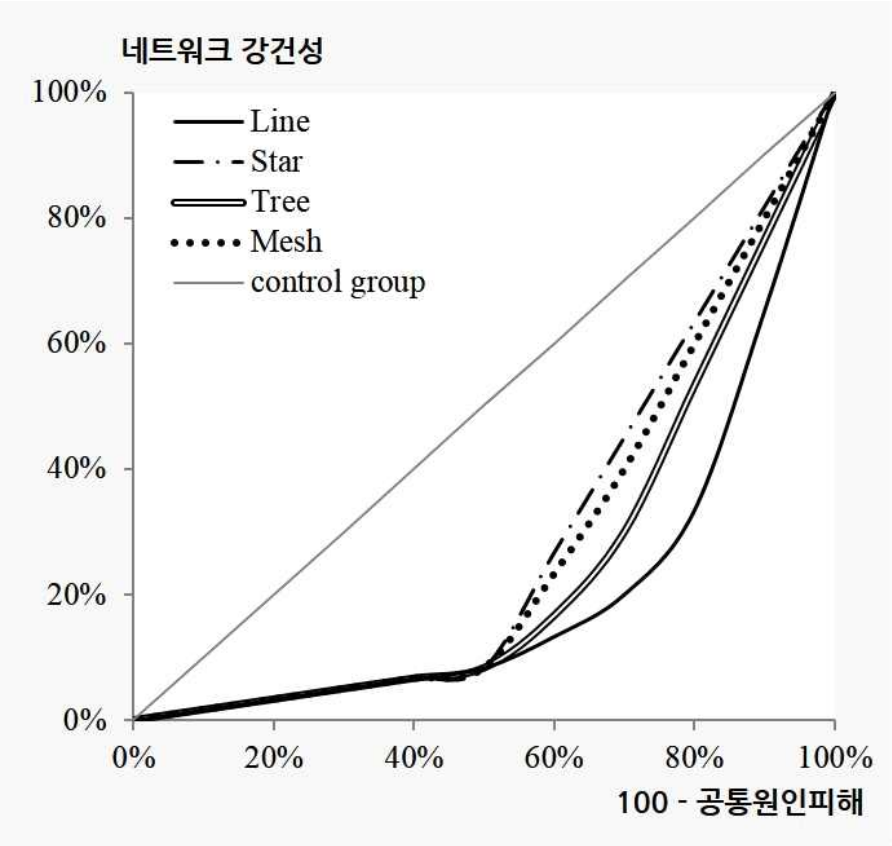
- 이때 네트워크 구성요소에 기입된 번호는 서비스 전달의 경로를 의미하며, 본 연구에서는 라이프라인 서비스는 높은 방향에서 낮은 방향으로만 전달된다고 가정함(예: 1→2)
- 또한 본 연구에서는 직접 연결된 두 구성요소 사이의 경로 길이는 선형, 별형, 나무형 연결방식에서는 동일하다고 가정하였으며, 메시형 연결방식의 경우 경로(1→5→6)의 길이가 경로 (1→4→6)의 길이보다 7:3의 비율로 길다고 가정하였음.
- 이에 따라 Inoperability Input-Output Model의 상호의존행렬은 [그림 35]의 아래와 같으며, 반복적인 계산의 편의를 위하여 본 연구에서 개발한 각 단계별 계산식을 아래 함수코드로 작성함.
- 이후 임의의 지진이 발생하여 네 개 네트워크 모두가 구성요소 1~6에 10%의 공통원인 피해를 입었다는 상황을 가정하여 네트워크 강건성을 평가함.

```
// common-cause failure matrix
 double [] C = new double[6];
 for (int i=0; i < 6; i++) {C[i] = nodes.get(i).Common-causeFailure;};

// (E-A)^(-1)
 double [][] E_A = new double[6][6];
 for (int i=0; i < 6; i++)
 {for (int j=0; j < 6; j++) {E_A[i][j] = Inverse_table(6*i+j+1);};};


// cascading failure matrix
 double[] X = new double[6];
  for(int i=0; i<6; i++)
  {for(int k=0; k<6; k++) {X[i] += E_A[i][k] * C[k];};};

for(int n=0; n<6; n++)
{nodes.get(n).CascadingFailure = min(100, C[n+3]*100);};


// total failure
TotalDamage =( nodes.get(0).CascadingFailure + nodes.get(1).CascadingFailure
             + nodes.get(2).CascadingFailure + nodes.get(3).CascadingFailure
             + nodes.get(4).CascadingFailure + nodes.get(5).CascadingFailure)/6 ;
```

[표 18] 공통원인피해 10% 증가 시 네트워크 강건성

구분	선형	별형	나무형	메시형
공통원인피해 (%)	10	10	10	10
강건성 (%)	35	18	23	20

- 그 결과, [표 18]과 같이 **같은 정도의 공통원인피해에 대하여 선형, 나무형, 메시형, 별형 연결 방식의 순서로 지진에 취약**하였으며, 선형의 연결방식을 그 외의 연결방식으로 변경하는 경우 **평균적으로 네트워크 강건성이 14.6% 향상**됨.
- 이와 같은 방법으로 구성요소의 공통원인피해를 0~100%까지 변화시킨 결과는 다음 [그림 36]처럼 도식화되는데, x축의 "100-공통원인피해"값이 y축의 "네트워크 강건성" 값과 같을수록, 즉 그래프가 대각선의 control group과 가까울수록 피해파급이 적은 것임.
- 따라서 지진으로 인한 물리적 피해로 모든 구성요소가 약 50%까지 기능저하가 될 때까지는 위의 선형, 나무형, 메시형, 별형 순서와 동일하게 피해파급이 진행되고 그 이후에는 네 종류의 네트워크 모두 유사하게 거동함을 알 수 있음.
- 이는 선형 연결방식 네트워크의 경우 1번 노드에서 6번 노드까지 서비스가 전달되는 동안 피해파급의 발생 확률도 함께 누적되기 때문이며, 별형 연결방식 네트워크의 경우 중앙의 노드에 피해가 발생한 경우를 제외하고는 구성요소 간 연쇄피해가 발생하지 않기 때문임.
- 그러나 별형 연결방식의 경우 중앙 노드가 모든 다른 구성요소와 연결되어 서비스 부하가 집중되므로, 구성요소가 많은 네트워크의 경우에는 적합하지 않음. 따라서 **현실의 라이프라인 네트워크의 강건성 확보를 위해서는 서비스의 연결 경로가 두 개 이상을 갖는 메시형 연결방식이 가장 적합**할 것임.



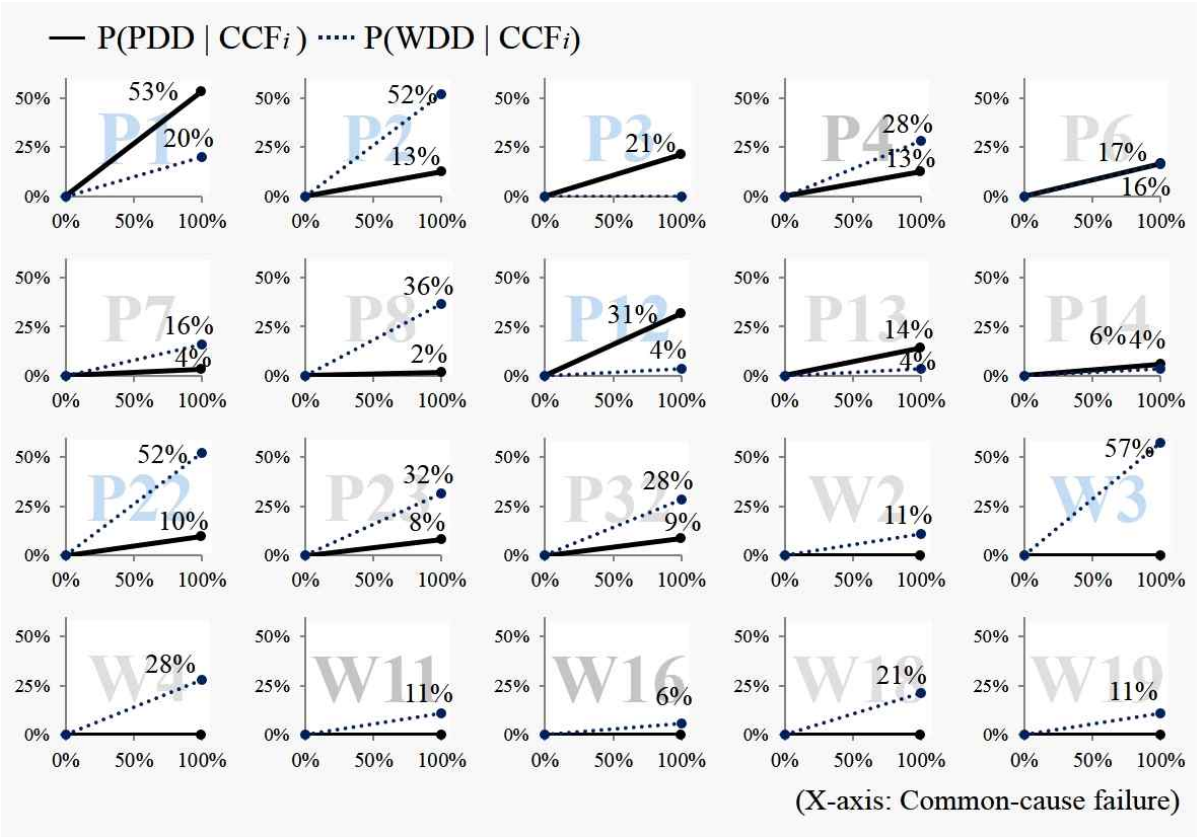
[그림 36] 네트워크 연결방식에 따른 강건성 변화

- 다음으로 지진 직후 성능평가 시점부터 복구완료시점까지의 기간을 단축하여 라이프라인 네트워크의 회복탄력성을 개선하는 방안을 제시하기 위하여, 본 단계에서는 **개별 구성요소 중 어떤 것을 우선적으로 복구하여 전체 네트워크의 성능을 향상시킬 수 있는지를 분석**함.
- 보다 구체적으로 본 연구 분석대상인 대구의 전력 및 상수도 네트워크에 대하여 위의 [그림 31]의 사례에서 기술한 것과 같이 규모 6.4의 지진이 발생한 상황을 시나리오 0으로 가정하고, 피해파급의 베이지안 모형 내 피해 사건 중 어떤 것을 먼저 회복하였을 때 최종 전력 분배 및 상수도 분배의 확률이 높아지는가를 비교함.

[표 19] 복구 우선순위에 따른 라이프라인 서비스 회복

시나리오	복구 우선순위	전력 분배 감소 확률 (%)	상수 분배 감소 확률 (%)
0	-	27.3	43.9
1	345kV 변전소	7.77	28.8
2	154kV 변전소	21.6	39.5
3	정수장	27.3	41.3
4	저수탱크	27.3	39.5
5	가압장	27.3	36.4
6	345kV 변전소→154kV 변전소	0	21.6
7	345kV 변전소→정수장	7.77	25.5
8	345kV 변전소→저수탱크	7.77	23.2
9	345kV 변전소→가압장	7.77	19.3

- 그 결과, <u>대구 지역의 경우 345kV 변전소를 우선적으로 복구하는 것이 전력과 상수 서비스 모두의 회복에 효과적</u>이었음([표 19]의 시나리오 1~시나리오 5).
- 또한 345kV 변전소의 회복 이후의 차 순위를 결정하기 위하여 시나리오 6에서 시나리오 9를 비교하면 전력의 경우 154kV변전소를 우선 복구하는 경우 전력 서비스 약 7.8%, 상수 서비스 약 7.2%의 재개가 예상되며, 가압장을 우선 복구하는 경우 상수 서비스 약 9.5%의 개선이 예상되었음.



[그림 37] 전력 및 상수 분배 공급 측면에서의 중요 구성요소 식별

- [그림 37]은 복구 우선순위의 선정을 구성요소 단위로 낮추어, 대구 지역 내 33개 전력 네트워크 구성요소와 24개 상수도 네트워크 구성요소 중 하나만 공통원인피해가 100%로 증가함을 가정하여 해당 피해로 인한 추가 연쇄피해(전력 및 상수 수급 감소)를 추정한 것임.
- 이때 네트워크 말단에 위치한 P5, P10~11, P15~P21, P24~P31, P33, W1, W5~W10, W12~W15, W17, W20~W24는 연쇄 피해를 발생시키지 못하므로 제외함.
- 구체적으로 살펴보면 <u>분석 대상 네트워크의 경우 피해파급이 가장 우려되는 구성요소는 전력의 경우 네트워크의 시작점 중 하나인 P1(53%)과 이와 직결되어 사례 지역 내 오른쪽 상단부분 전력 수급을 담당하는 P12(31%), 그리고 P3(21%)의 순</u>이었음.
- <u>상수의 경우도 마찬가지로 사례지역 급수의 시작점 중 가장 큰 용량을 담당하고 있는 W3(57%)이 상수 공급의 가장 중요 요소로 식별되었으며, 그 다음은 상수 네트워크 자체의 피해가 아닌 P2(52%) 또는 P22(52%)의 피해로 인한 전력 공급 저하에 따른 상수의 수급 감소 영향이 클 것으로 추정</u>되었음.

마. 연구 수행 결과에 대한 전문가 및 사용자 평가

❑ 1차년도 연구 성과 평가 및 중간 모니터링 결과

- 본 연구진은 1차년도 연구 수행 결과물인 국내 주요 라이프라인 시스템 네트워크지도(질적성과 1-1, 1-2), 라이프라인시스템 구성요소 지진 취약도 평가모듈(질적성과 2-1, 2-2), 라이프라인 네트워크 피해파급의 베이지안 모형(질적성과 3-1)에 대하여 **해당 결과물이 연구의 목적에 적정하게 개발되었는지 전력, 건축, 도시 및 시설물 관리 분야 전문가 총 5인을 대상으로 적정성 평가를 수행**함.
- 그 결과 아래 [표 20]과 같은 의견을 수렴 받았으며, 전문가 평가 의견을 기반으로 연구내용을 보완하였음.

[표 20] 1차년도 전문가 적정성 평가 결과 및 의견 반영 방안

평가 항목	전문가	평가 의견	평가의견 반영 방안
국내 주요 라이프라인 시스템 네트워크 지도	한국 원자력 연구원 K 책임연구원	▪ 실제 변전소 부지는 넓은 땅에 다양한 건물의 집합으로 이루어져있기 때문에 변전소를 하나의 위치 정보로 표현한다면 분석하고자 하는 핵심 기기나 원전 등의 위치를 대표로 하는 것이 적합할 것임. ▪ 본 성과의 목적이 정확한 위치 정보의 제공 보다는 시설 간 연결을 통한 연쇄 피해의 확인이기 때문에 위치의 정확성에 대한 세밀한 검증은 필요하지 않을 것으로 사료됨.	▪ 우선적으로는 구글 지도를 활용하여 발전소, 변전소 등의 대표 위도와 경도를 취득하며, 이를 실제 GIS지도로 구현하여 원전 또는 주요기기 위치에 맞게 보정함. ▪ 만약 원전이 여러개 있는 원자력발전소의 경우 원전 가운데에 위치하도록 함.
	서울대학교 건설환경공학부 J 교수	▪ 국내의 경우 보안의 이유로 발전소, 변전소 등 전력 시설의 위치 정보를 제공하지 않고 있으며 포털 사이트의 항공위성 사진에서도 표기되지 않음. ▪ 따라서 해당 네트워크 지도의 위치를 비교할 대상이 마땅하지 않으나, 현재 한국전력이나 기타 연구원에서 제공하고 있는 전력 계통도와 비교할 때 유사성을 보임.	▪ 전문가 의견과 같이 네이버, 다음 등 국내 지도의 경우 라이프라인시스템의 항공사진을 제공하지 않아 구글맵이나 영국의 Open Street Map을 사용함.
	이화여자대학교 미래사회공학부 H 교수	▪ 현재 개발된 성과의 경우 2D 지도가 메인으로 보이며, 향후 GIS 개발을 확장할 시에 얻을 수 있는 추가적인 정보에 대하여 고려가 필요함. ▪ 그 이유는 현재 국내에서 GIS 또는 항공사진이 전력계통을 표현하고 있지 못하기 때문임. 따라서 2D지도와 GIS의 큰 차이점이 없다면 GIS를 제외하고 2D 지도로 진행하되 154kV변전소까지 세부적으로 다루는 것도 대안이 될 수 있음.	▪ 현재 상용으로 개발된 GIS 지도의 활용으로 인하여 GIS지도가 시각화 도구로써 한정됨에 따라 전문가 의견에 따라 보다 자세한 2D 지도를 제시함.

평가 항목	전문가	평가 의견	평가의견 반영 방안
라이프라인 시스템 구성요소 지진 취약도 평가 모듈	한국 원자력 연구원 K 책임연구원	▪ 2008년 변전소 취약도함수 국산화 연구 이후 후속 연구가 진행되지 않았으나, 변전소 구조 및 내진해석 결과는 지금과 그 때와 크게 다르지 않고 국내 변전소의 지진취약도를 구한 연구 중 공개된 것이 없는 관계로 2008년 연구에서 제안한 결과값을 사용해도 무방할 것임. ▪ 국내외를 불문하고 원자력 발전소의 경우 국가 기밀 시설로 분류되기 때문에 지진 취약도 곡선이 제공되지 않음. 현재 본 연구에서 활용된 FEMA의 지진취약도 함수 역시 화력발전소를 중점적으로 설명하고 있을 것으로, 원자력 발전소와의 분류가 요구됨. ▪ 특정 최대지반가속도 추정식을 선정하여 사용하는 것은 논란의 여지가 있을 수 있음. 일반적으로 관련연구에서는 6개 내외의 추정식을 사용하여 각각 추정 값을 구하고 그의 평균으로 사용하는 것이 통용됨.	▪ 현재 배포된 국내 변전소 지진취약도 함수를 사용하여 변전소 초기 손실을 예측함. ▪ 국내에 적합한 사례 연구가 없는 발전소, 정수장, 가압장의 경우 우선적으로 미 연방 재난관리청 FEMA의 지진취약도 함수를 준용함. ▪ 국내외에서 개발된 총 6개의 최대지반 가속도 추정식의 평균을 본 연구 대푯값으로 사용함.
	광운대학교 건축공학과 Y 교수	▪ 본 연구가 최대지반가속도를 기반으로 피해를 평가한다면, 위도 경도의 허용오차범위가 클 수 있음. ▪ 만약 그 단계에서 모든 시설물이 오차범위 안에 속한다면 해당 성과가 적정하게 개발되었다고 판단할 수 있을 것임.	▪ 개발모델의 검증을 위해 동일한 최대지반 가속도의 값을 갖는 위도, 경도의 범위를 계산한 후 제시한 모델이 그 범위 안에 속하는지를 비교하는 단계를 포함시킴.
	서울시립대학교 건축학부 H 교수	▪ 우선적으로 지진에 대한 대응이 이슈가 되고 있는 현 시점에서 다뤄야할 연구라고 생각되며 구조적인 관점 외에 기능적인 것을 고려했다는 데에 선행 연구와 다른 차별성이 있음. ▪ 그러나 원자력발전소의 경우, 전력 계통시설 중에서도 피해 판단에 있어 차별화 된 시나리오 수립 및 접근이 필요할 것임.	▪ 앞서 언급한 것과 같이 FEMA의 지진취약도 함수를 준용하되 원자력 발전소의 경우 피해 단계를 손상 없음 (성능=100%)과 비상정지 (성능=0%) 로만 분류함.

평가 항목	전문가	평가 의견	평가의견 반영 방안
라이프라인 네트워크 피해파급의 베이지안 모형	한국 원자력 연구원 K 책임연구원	▪ 본 과제가 전력계통 구성요소 간 의존도를 기반으로 하는 것을 차별성으로 앞세운다면 해당 수식의 전개과정을 보다 구체적으로 기술하고, 강조하는 것이 필요함.	▪ 세부수행연구내용 항목을 신설하여 각 단계별 연구 진행 및 수식 등을 상세하게 기술함.
	광운대학교 건축공학과 Y 교수	▪ 본 연구차년도에서 개발된 성과뿐만 아니라 해당 피해파급 모형을 활용하여 최종적으로 구하고자 하는 것이 무엇인지, 2차년도 연구 내용과 연결 지어 추가적으로 설명을 보충할 필요가 있음.	▪ 연구 2차년도 질적성과로 네트워크 강건성 평가 모듈과 시각화모듈에 대하여 개발을 수행하였으며 이에 대한 예시를 보고서에 기술함.
	서울시립대학교 건축학부 H 교수	▪ 본 연구의 시간적 범위가 지진 직후이기 때문에 미국 FEMA 뿐만 아니라 일본 재난관리청의 재난 대응 체계 및 국내 각종 재난 대응 매뉴얼을 참고하여 피해 판단과 더불어 비상운영 등과 관련 사항을 대응 시나리오에 포함하는 것이 필요함.	▪ 본 연구개발의 최종 활용은 네트워크 지진피해 예측과 더불어 지진피해 완화임. ▪ 따라서 연구 핵심 성과로써 라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책을 추가 신설하였으며, 개발 모델을 활용하여 라이프라인 네트워크 강건성을 높이는 방안을 제안함.
	서울대학교 건설환경 공학부 J 교수	▪ 실제 본 연구의 적용처와 활용 방안에 대한 구체적인 사례 제시가 필요함. ▪ 전력 공급 저하로 인한 이재민의 분포 상황, 거주 또는 공공 서비스 지원 등 차후의 활용 방안에 대한 논의도 필요함.	▪ 앞서 언급한 것과 마찬가지로 본 연구개발성과의 활용성을 높이기 위하여 핵심 성과로써 라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책을 제안함. ▪ 또한 기대효과 및 활용방안을 통해 본 연구가 지진 발생 이전, 발생직후, 발생 수 주 후에 활용될 수 있는 시나리오를 기술함.

- 또한 전문기관의 과제 보고 일정에 따라 2017년 12월 7일 평가위원 4인을 대상으로 중간모니터링을 수행하였으며, 이에 대한 수정보완 반영내용은 다음과 같음.

[표 21] 중간모니터링 평가의원 의견 및 수정보완 반영 내용

수정·보완 요구사항	반영내용 요약
예측모델의 신뢰성 확보 방안 마련 필요	▪ 개발모델의 검증을 위해 동일한 최대지반 가속도의 값을 갖는 위도, 경도의 범위를 계산한 후 제시한 모델이 그 범위 안에 속하는지를 비교하는 단계를 포함하였음. ▪ 또한 라이프라인 구성요소 손실의 경우 지진 이력 데이터가 미비한 국내에는 비교할 수 있는 실 사례가 없어 오차율 검정을 수행할 수 없음. ▪ 이에 대한 보완방안으로 본 연구진은 질적 성과로써 “개발모델에 대한 검증방안 항목”을 추가 신설하여 정량적, 정성적 검증을 수행함. ▪ 자세한 내용은 본 보고서의 51p.~53p.에 기술함.
Node(발전소, 정수장, 가압장 등) 중심의 지진취약도를 고려할 때 각 시설의 지진대책 및 여건 등을 반영하는 catalog 방법 적용 검토 필요	▪ 본 연구가 준용하고 있는 FEMA의 지진취약도는 시설물의 특성(예: 종류, 용량 등)과 내진설계 유무를 기준으로 구분 됨. ▪ 심사위원의 의견을 반영하여, 본 연구에서는 개별 시설의 지진 대응 체계 및 구조 등을 종합적으로 고려하는 방안을 제안함. ▪ 예를 들어 변전소의 경우 국내에서 통용되는 3상 4Bank 변압기 구조를 적용하여 서비스가능도를 판단하였음. ▪ 자세한 내용은 본 보고서의 32p.~40p.에 기술함.
차년도 최종결론에 Node에 Line을 추가하는 연구 계획을 수립하여 차기 과제로 제시 필요	▪ 본 연구에는 라이프라인 네트워크 구성 요소 중 주요 시설물에 해당하는 발전소, 변전소, 정수장, 가압장의 지진 피해로 인한 최종수요자의 서비스 공급 중단 확률을 예측하며 이때 송배전선로나 송배수관로에서의 피해는 없는 것으로 가정함. ▪ 그러나 현실에서는 각 시설물을 연결하는 선로에서의 피해도 함께 발생할 수 있음. ▪ 따라서 본 연구과제 종료 후 추가 연구의 확장방안으로써 Line의 피해파급까지 고려하는 지진 피해 예측 도구를 제안함. ▪ 자세한 내용은 본 보고서의 77p.에 기술함.

❑ 2차년도 연구성과 평가 결과

- 이와 마찬가지로 2차년도에서도 연구 수행 주요 결과물인 라이프라인 시스템 네트워크 지진재해 기능저하 예측 모델(질적성과 3-1, 3-2, 3-3, 3-4)과 라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책(질적성과 4-1)에 대하여 **해당 결과물이 연구의 목적에 적정하게 개발되었는지 또한 본 결과물을 현실에 사용하기 타당한지에 대하여 전력, 건축, 도시 및 시설물 관리 분야 전문가 또는 예상 사용자 총 5인을 대상으로 적정성 및 타당성 평가를 수행하였으며,** 그 결과에 대한 요약 및 반영내용은 다음 [표 22]와 같음.

[표 22] 2차년도 전문가 적정성 평가 결과 및 의견 반영 방안

평가 항목	전문가	평가 의견	평가의견 반영 방안
라이프라인 시스템 네트워크 지진재해 기능저하 예측 모델	한국전력 S대리	▪ 연구 주제의 전문가가 아닌 사용자도 쉽게 개발모델을 활용할 수 있도록 친절한 설명이 추가 되어야함.	▪ 개발모델의 사용성을 증진시키기 위하여 연구 개발 모델 전반에 실제 예시 (Lifeline System=전력시스템, Component=발전소, 변전소 등)를 추가하였음. ▪ 시각화 모듈 개발과정에서 단계별 사용법을 명시하고 인터페이스 내 다양한 그래프를 추가하여 분석력을 높임.
	서울대학교 건설환경공학부 J 교수	▪ 연구가 재난 이후의 상황을 예측하고 있으므로, Case Study에 대한 Validation은 Point Estimation보다는 Pattern Estimation으로 접근하는 것이 적합함. ▪ 연구 모델을 개발함에 있어 각 단계별 검증은 수행 하였으나, 전체 모델에 대하여 검증도 이루어져야 할 것임.	▪ 재난 피해를 예측하는 연구는 실제의 사례와 비교할 수 있는 데이터가 비교적 적기 때문에 평가위원의 의견과 같이 Pattern Estimation으로 검증을 수행하거나, 연구 진행의 논리에 대하여 전문가 평가를 수행함. ▪ 본 연구 또한 각 단계를 진행함에 있어 관련 분야 전문가의 자문을 통해 의견을 수렴하는 과정을 거쳤으며, 특히 2016 경주 지진을 통해 일부 데이터의 오차율 검정을 수행하였음.
	이화여자대학교 미래사회공학부 H 교수	▪ 기존 연구들(예: 토목공학 분야의 System Engineering 또는 건축구조분야의 Seismic Behavior Analysis)과 비교하였을 때 본 연구가 어떤 차이점이 있는지 강조할 것.	▪ 본 연구는, 네트워크 간 상호의존을 고려하여 단일 시설물의 공통원인피해로 야기되는 연쇄피해를 예측함에 있어 기존 건축구조분야의 연구와 차별점이 있음. ▪ 또한 System Engineering 또는 Social Network Analysis 등 네트워크 분석 분야의 연구와 비교하여 구성요소 상태를 성공, 실패의 두 가지 단계가 아닌 Multi state(손상없음, 약간손상, 보통손상, 심각손상, 완전송상)로 구분하며, 이를 지진 공학적 이론을 근거로 판단한다는데 차이점이 있음을 기술함.

평가 항목	전문가	평가 의견	평가의견 반영 방안
라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책	포스코 건설 S 부장	▪ 현재 제시한 기여점보다 구체적으로 본 연구가 어떻게 활용될 수 있을지에 대한 고민이 필요함. ▪ 실제 현실의 예를 들어서 Lifeline System Manager인 실무자가 궁금해 하는 Practical Issue를 다루는 것을 제안하여 연구 활용 방안을 제시할 것.	▪ 구체적으로 본 연구는 지진 이전에 라이프라인시스템의 성능을 예측하여, 발생 가능한 피해를 예측하고 보완하는데 활용될 수 있음. ▪ 예를 들어 평가위원의 의견과 같이 본 연구모델을 통해 Cascading failure가 급격하게 전개되는 지진의 규모(Tipping Point)를 특정하여 라이프라인 시스템의 내진설계기준을 제안하거나, 현재 네트워크에서 가장 key가 되는 중요구성요소를 파악하여 선제적으로 보완할 수 있음. ▪ 또한 지진 이후에 라이프라인 구성요소의 물리적 피해가 계측되면, 본 연구모델을 통해 네트워크 분석을 통해 어떤 구성요소를 먼저 복구하는 것이 라이프라인 시스템의 성능을 회복하는데 가장 효과적인지 비교할 수 있음. 이에 대한 예시와 활용 내용은 핵심성과 4-1에서 기술함.
	한국기술 교육대학교 C교수	▪ 연구 결과물을 통해 Lifeline System의 복구 우선순위를 제안하는 것이 주요 contribution이기 때문에, 연구의 시간적 범위를 복구 단계까지 확장시켜야 함.	▪ 평가 위원 의견에 다라 지진 이후 복구 계획에 따라 Lifeline System의 성능 변화를 비교하는 절을 추가하였음. ▪ 해당 분석결과를 통해, 본 연구가 지속적으로 주장한 것과 같이 전체 네트워크 피해파급에 영향이 큰 구성요소의 식별과 적절한 관리가 전체 성능 회복에 도움을 줄 수 있다는 시사점을 도출할 수 있음.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

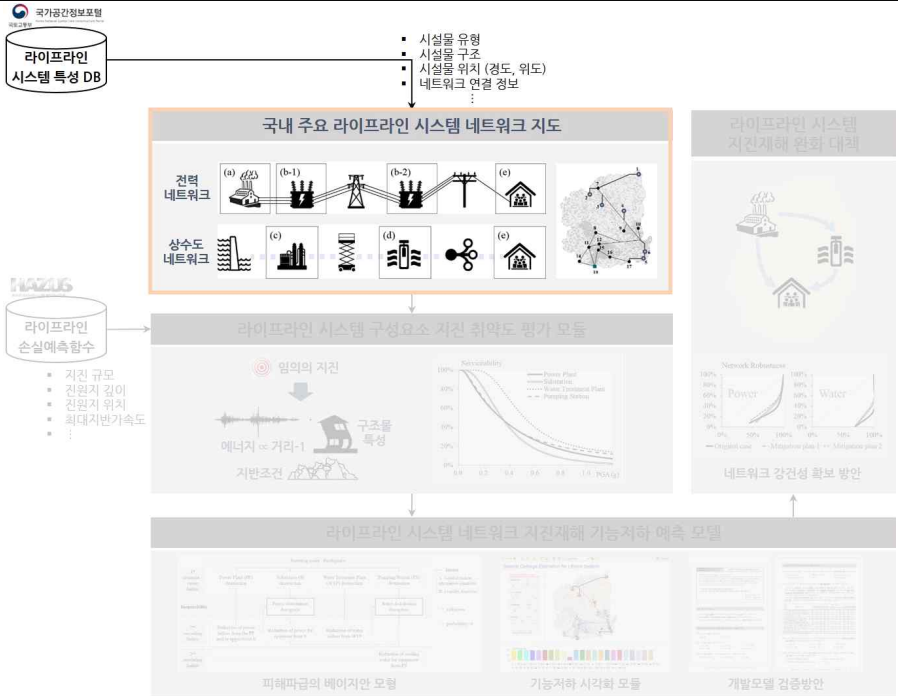
4-1. 연구개발성과 목표 및 달성도

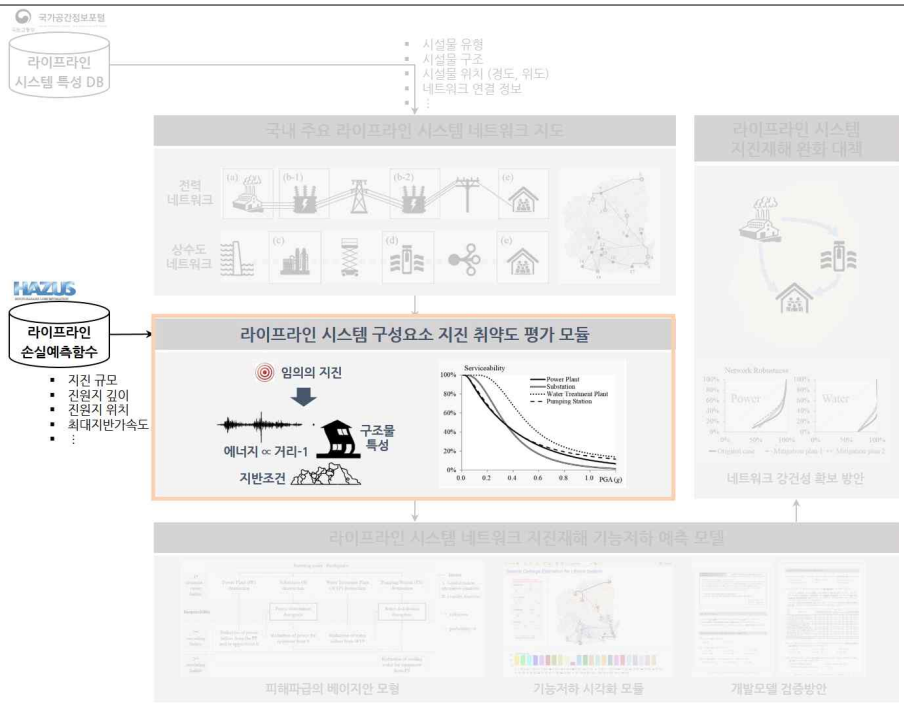
❑ 성과점검기준표

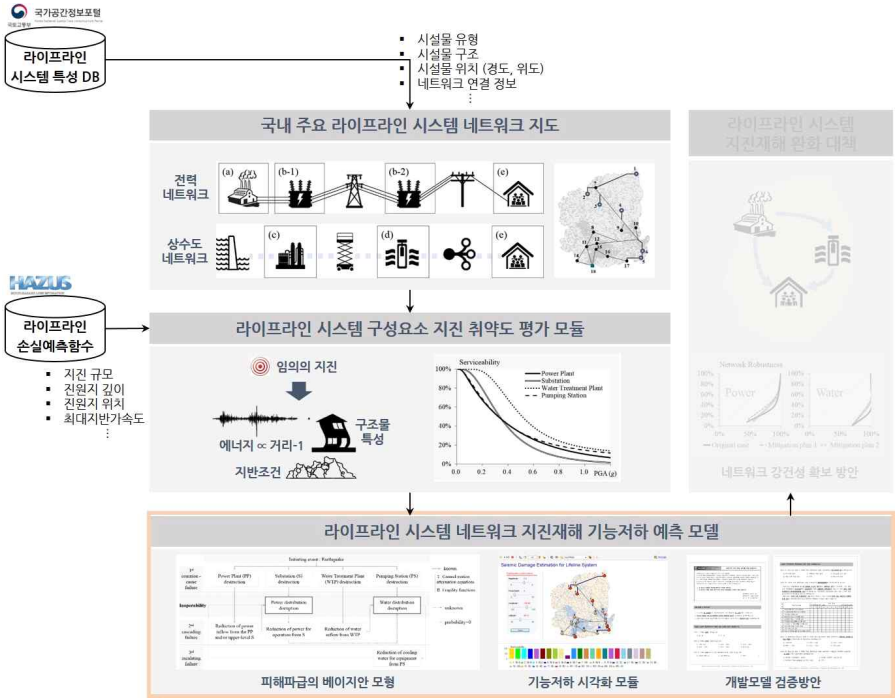
구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증 방법	가중치	
주관	1	국내 주요 라이프라인 시스템 네트워크 지도	1-1	라이프라인 시스템 특성 데이터베이스	①	라이프라인 시스템 공간적, 구조적, 기능적 데이터 집합	1건	1건	한전, 수자원공사 등에서 사용되는 DB와 비교하여 유사성 확인	전문가 대상 적정성 평가	10%	특허출원: 0건 특허등록: 0건 논문 : 1건 시제품 : 0건 S/W : 1건
			1-2	GIS 맵핑 네트워크 지도	①	GIS 맵핑 프로그램으로 작성한 라이프라인 네트워크 지도	1건	1건	해당지역의 항공 위성사진과 비교하여 유사성 확인	전문가 대상 적정성 평가	15%	
	2	라이프라인 시스템 구성요소 지진 취약도 평가 모듈	2-1	지진 규모별 최대지반가속도 감쇠함수	①	임의의 지진에 대해 진앙거리를 기반으로 최대지반가속도를 추정하는 함수	오차율 5% 미만	오차율 2.15%	감쇠함수를 통해 구한 예측 값과 실제 지진 사례값을 비교	실제 지진 사례와 비교	5%	특허출원: 1건 특허등록: 1건 논문 : 1건 시제품 : 0건 S/W : 0건
			2-2	라이프라인 단일 구성요소의 손실예측함수	①	최대지반가속도에 따른 손상발생확률을 예측하는 함수	오차율 10% 미만	※	손실예측함수를 통해 구한 예측 값과 실제 지진 사례값을 비교	실제 지진 사례와 비교	5%	
	3	라이프라인 시스템 네트워크 지진재해 기능저하 예측 모델	3-1	라이프라인 네트워크 피해파급의 베이지안 모형	①	라이프라인 기능저하를 유발하는 피해 사건 간 인과관계를 도식화한 모형	1건	1건	관련 전문가 3인을 대상으로 모형 검증	전문가 대상 적정성 평가	15%	특허출원: 0건 특허등록: 0건 논문 : 2건 시제품 : 0건 S/W : 2건
			3-2	라이프라인 네트워크 강건성 평가 모듈	①	지진 직후 라이프라인 네트워크에서 서비스를 공급받는 최종수요자를 예측하는 모듈	오차율 10% 미만	※	강건성 평가 모듈을 통해 구한 예측 값과 실제 지진 사례값을 비교	실제 지진 사례와 비교	10%	
			3-3	기능저하 시각화 모듈	①	라이프라인 시스템 기능저하 값 및 최종수요자의 서비스 분포를 네트워크 지도 내 구현	데이터 송수신 정확성 95% 이상	100%	시각화 모듈에서 구현되는 데이터의 수 / 구현이 필요한 데이터의 수	데이터 송수신 정확성 95%이상	10%	
			3-4	개발 모델의 검증방안	①	개발 모델의 테스트 및 검증절차 수립	3건 이상	5건	관련 전문가 3인을 대상으로 모델 검증	전문가 대상 적정성 평가	15%	
	4	라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책	4-1	개발 모델을 활용한 라이프라인 네트워크 회복탄력성 확보 방안	①	개발 모델을 활용 라이프라인 네트워크 회복탄력성을 확보하는 방안 제시	강건성 10% 이상 향상	14.6%	제안한 방안을 통해 라이프라인 회복탄력성 10% 이상 향상	완화 제안 이전과 비교	15%	특허출원: 0건 특허등록: 0건 논문 : 1건 시제품 : 0건 S/W : 0건
계											100%	특허출원: 1건 특허등록: 1건 논문 : 5건 시제품 : 0건 S/W : 3건

※ 라이프라인 구성요소 손실 및 네트워크 강건성의 경우 지진 이력 데이터가 미비한 국내에는 비교할 수 있는 실 사례가 없어 오차율 검정을 수행할 수 없음. 이에 대한 보완방안으로 연구 질적 성과 3-4로써 개발모델에 대한 검증방안 항목을 추가 신설하여 정량적, 정성적 검증을 수행함.

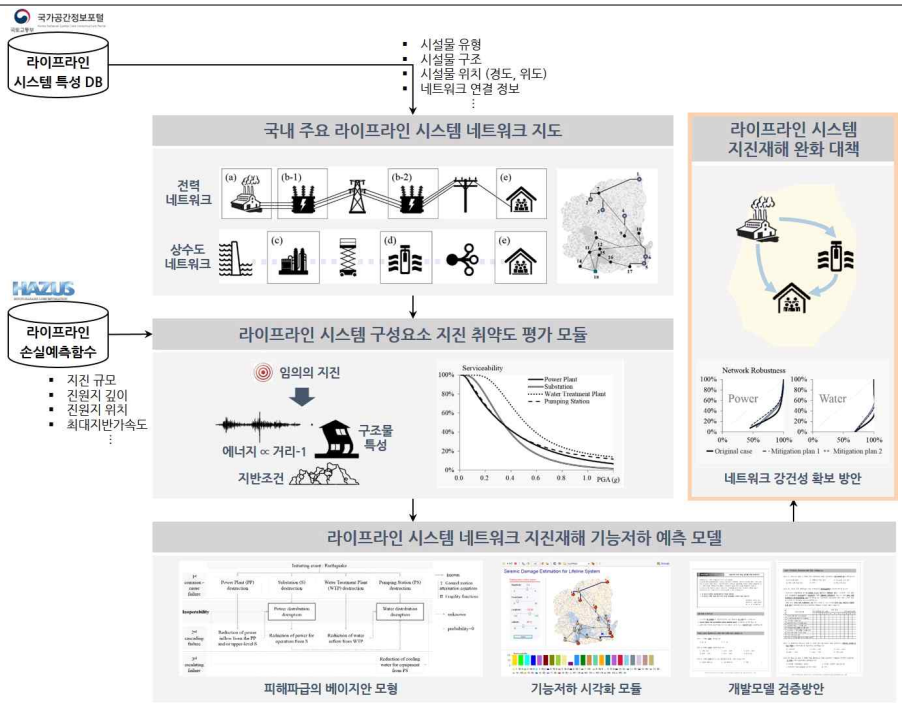
❑ 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1		
개념도		
정의	국내 주요 라이프라인시스템의 거점시설을 노드(Node)로 보조시설을 링크(Link)로 표현하는 GIS 기반 네트워크 지도	
목적	▪ 광역 네트워크적 특성을 갖는 라이프라인시스템의 지진 재해 진단을 위해 라이프라인 구성 요소 간 연결경로를 포함한 지도를 작성함 ▪ 전체 네트워크를 구성하는 여러 개의 노드의 개별 피해가 전체 시스템 기능 저하로 전이되는 확률을 기반으로 지역 단위 피해를 예측함	
성능목표	<u>기존기술 수준</u> 개별 시설물 단위의 GIS 지도를 기반으로 구조체 변위를 분석함 <u>개발기술수준</u> 기능적(하나의 시설물의 Output이 다른 시설물의 Input이 되는가), 위치적(두 시설물이 같은 지역에 밀집되어있는가), 복원적(하나의 시설물이 다른 시설물을 대체할 수 있는가)의 개념으로 분류하여 GIS 네트워크 지도 개발	
성과달성 책임자 (소속기관)	박문서 (서울대학교)	
소요기간	2017.04 ~2017.10 (6개월, 연구 1년차)	
성과달성 확인방법	▪ 라이프라인 시스템 특성 데이터베이스: 국가공간정보 포털 제공 DB와 비교하여 적정성평가를 수행하고, 만족 시 1건으로 간주 ▪ GIS 맵핑 네트워크 지도: 해당지역의 항공 위성사진과 비교하여 유사성 확인 후 만족 시 1건으로 간주	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	학술발표 1건
	저작	0건
	S/W	등록 1건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 2		
개념도		
정의	임의의 지진에 대하여 진앙지까지의 거리를 기반으로 계산되는 최대지반가속도를 x축으로, 라이프라인 단일 구성요소의 서비스제공가능도를 y축으로 하는 정규누적확률분포곡선	
목적	▪ 임의의 지진에 대하여 진앙거리를 기반으로 최대지반가속도를 추정하는 함수를 작성함 ▪ 과거 지진 이력을 기반으로 라이프라인시스템 단일 구성요소 별 최대지반가속도에 따른 서비스제공가능도를 판단하는 손실예측함수를 작성함	
성능목표	<u>기존기술 수준</u> 지진계측기가 설치된 구조물에서 계측된 최대지반가속도를 기반으로 특정 시설물의 구조, 재료, 목적 등 물리적 특성에 따른 지진 취약도 산정 <u>개발기술수준</u> 지진계측기가 설치되어 있지 않은 건물이라도 진앙거리를 계산하여 최대지반가속도를 추정할 수 있도록 하며, 국내 구조물의 지진응답해석을 통해 범용적으로 개발된 지진 취약도 함수를 일부 적용하여 현실성을 높임	
성과달성 책임자 (소속기관)	박문서 (서울대학교)	
소요기간	2017.06 ~2017.09 (3개월, 연구 1년차)	
성과달성 확인방법	▪ 지진 규모별 최대지반 가속도 감쇠함수: 감쇠함수를 통해 구한 예측 값과 실제 지진 사례값을 비교한 오차율이 5%미만 ▪ 라이프라인 단일 구성요소의 손실예측함수: 손실예측함수를 통해 구한 예측 값과 실제 지진 사례값을 비교한 오차율이 10%미만	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 1건, 등록 1건
	논문	학술지(SCI급) 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 3	
개념도	
정의	라이프라인 시스템의 서비스제공가능도를 x축으로 실제 최종수요자 함수인 네트워크 강건성을 y축으로 하는 함수와, 라이프라인의 기능 저하 및 지역별 최종수요자의 분포를 라이프라인 네트워크 지도 내에 시각화한 모델
목적	▪ 서로 다른 라이프라인 시스템 간 상호의존에서 기인하는 피해파급을 고려하기 위하여 라이프라인 시스템의 기능저하를 유발하는 피해 사건을 기술하고, 각 사건 간 인과관계를 도식화하는 피해파급 모형을 작성함 ▪ 지진 직후 라이프라인 네트워크에서 서비스를 공급받는 최종 수요자를 예측하는 값인 네트워크 강건성 평가 모듈을 개발함 ▪ 지진으로 손상된 라이프라인 시스템의 기능저하 값 및 지역 별 최종 수요자의 분포를 네트워크 지도 내 시각화 함
성능목표	<u>기존기술 수준</u> 라이프라인 시스템의 서비스제공가능도만을 분석하며, 그 공급량이 피해파급으로 인해 최종 수요로 전달되며 어떻게 변화하는지 고려하지 못함 <u>개발기술수준</u> 라이프라인 구성요소와 시스템 간의 상호의존으로 인하여 지진으로 인한 피해가 파급되는 것을 정량화하여 추정하며, 공급자 중심이 아닌 수요자 측면에서의 공공서비스 기능저하를 진단함
성과달성 책임자 (소속기관)	박문서 (서울대학교)
소요기간	2017.08 ~2018.06 (10개월, 연구 1/2년차)
성과달성 확인방법	▪ 라이프라인 네트워크 피해파급 모형: 개발 모형에 대하여 관련 전문가 3인을 대상으로 적정성 평가를 수행하고, 만족 시 1건으로 간주 ▪ 라이프라인 네트워크 강건성 평가 모듈: 평가 모듈을 통해 구한 예측값과 실제 지진 사례값을 비교한 오차율이 10% 미만 ▪ 기능저하 시각화 모듈: 라이프라인 시스템의 기능저하 값을 네트워크 지도 내 구현하였을 때 데이터의 송수신 정확성이 95%이상 ▪ 개발 모델의 검증방안: 제안한 검증방안에 대하여 관련 전문가 3인을 대상으로 적정성 평가를 수행하고, 만족 시 1건으로 간주

성과달성에 따른 정량적 성과		
	특허 출원/등록	0건
	논문	학술지(SCI급) 1건, 학술지(KCI급) 1건
	저작	0건
	S/W	등록 2건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 4	
개념도	
정의	지진 이후 라이프라인 네트워크의 서비스 공급 지속성을 확보하기 위해 강건성을 높이는 방안을 제시하고 여러 가지 방안을 개발된 모델에 적용하여 그 효과성을 분석한 보고서
목적	▪ 지진이 발생 이전에 네트워크의 연결방식을 분산화하거나 모듈화하여 라이프라인 네트워크의 강건성을 확보하는 방안을 제안함 ▪ 지진이 발생 직후 피해파급 발생 확률이 높은 노드를 대상으로 활용 가능한 백업 시스템을 구축하거나 우회경로를 제안하여 라이프라인 네트워크의 강건성을 확보하는 방안을 제안함
성능목표	<u>기존기술 수준</u> 라이프라인 시스템의 지진재해를 피해복구비용으로 추정하며, 복구비용 저감을 위해 시설물 개별적으로 구조 보강을 수행할 것을 제안함 <u>개발기술수준</u> 라이프라인 시스템의 지진재해를 최종수요자의 함수로 추정하며, 수요자의 공공서비스 공급 지속성 확보를 위해 지역 단위 라이프라인 네트워크 기능 유지 관점에서의 완화대책을 제안함
성과달성 책임자 (소속기관)	박문서 (서울대학교)
소요기간	2018.03 ~2018.12 (9개월, 연구 2년차)
성과달성 확인방법	▪ 라이프라인 시스템 지진재해 완화 대책: 제안한 완화 대책을 개발 모델을 통해 비교분석하고 라이프라인의 강건성을 10% 이상 향상시키는 방안을 채택함

성과달성에 따른 정량적 성과		
	특허 출원/등록	0건
	논문	학술발표 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

❑ 정량적 연구 성과 목표 및 달성도

구분	최소 성과 목표 (5점 이상)	달성도	비고
SCI(E)급 학술지 게재 (IF 1.8미만 1점)	1건	2건	▪ Journal of Infrastructure System (July, 2018) doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000437
			▪ Journal of Infrastructure System (Aug., 2018) doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000449
일반 학술지 게재 (1점)	2건	3건	▪ Proceedings of the International Workshop on the Computing in Civil Engineering, ASCE
			▪ 한국건설관리학회 국문논문집 (2018.05)
			▪ Proceedings of the International System Dynamics Conference, SDS
특허 출원 (1점)	1건	1건	▪ 출원번호: 10-2017-0160443
특허 등록 (2점)	-	1건	▪ 등록번호: 10-1930174
소프트웨어 등록 (1점)	1건	3건	▪ 등록번호: C-2017-026647
			▪ 등록번호: C-2018-024578
			▪ 등록번호: C-2018-040042
소계(점수)	5점	11점	▪ 초과달성

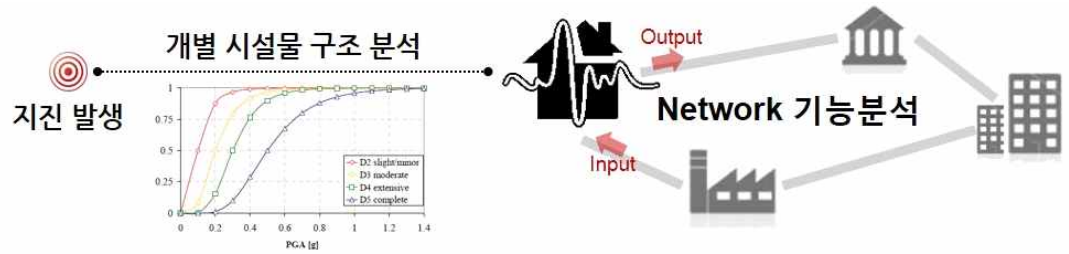
4-2. 관련 분야 기여도

❑ 국토교통부 국가공간정보포털 제공 데이터를 활용한 연구 신뢰성 확보

- 본 연구 핵심성과 중 하나인 라이프라인시스템 네트워크 지도 작성을 위해서는 지형, 지질, 토지이용, 도로 등 다양한 공간정보에 대한 수집이 필수적임.
- 이에 본 연구는 집단지성을 통해 개발되는 Open Street Map을 기본 GIS 지도로써 활용하며, 부가적인 항목에 대하여 **국토교통부의 국가공간정보포털 및 국토지반정보 통합 DB센터, 국토지리정보원의 On-Map 등에서 제공하는 공간정보 및 오픈 API를 적극 활용하여 객관적이고 신뢰성 높은 기초자료를 획득**하였음.
- 또한 지난 경주 지진 이후 "경주지진, 사회기반 시설은 안전한가?"를 주제로 진행된 대한토목학회 심포지엄 자료를 심층 검토하고, 대한건축학회의 "경주지진 피해사례와 지진방재 대책의 방향"포럼(2017년 10월 27일)에 참석하여 지진 대응 관련 선진 기술에 대한 지속적인 검토를 수행하였음.
- 이외에도 한국건설안전학회 춘계연합세미나(2018년 6월 15일), 대한건축학회 아시아 건축교류 국제 심포지엄(2018년 10월 24일~25일) 등 다양한 연구 학회 참석을 통해 현재 수행되고 있는 선진 연구 결과를 본 연구에 적극 활용하고자 하였음.

❑ 구조적 재난대응(내진설계)에서 기능적 재난대응(복원력확보)으로의 확장

- 지진 재해를 방지하는 가장 기본적인 대응 방법은 내진설계기준을 강화하거나 내진성능 미확보 건물에 대하여 구조적 보강을 수행하는 것임.
- 이에 주요 라이프라인시스템의 경우 지진계측센서를 통한 조기경보, 원격제어 시스템 등 공학적으로 충분한 내진안전성을 확보하기 위한 연구가 수행되고 있음.
- 그러나 이와 같이 **개별 시설물의 지진 취약도를 향상시키는 방법은 기반 시설물들이 네트워크로 연결되어있는 스마트 도시에 적용하기에는 한계**가 있음.
- 이에 따라 지역단위의 재난대응을 의미하는 도시 복원력(Resilience)이 대두되고 있으며, **도시복원력은 재해 발생이후 도시가 본래의 상태로 빨리 복구할 수 있는 역량**을 나타냄.
- 본 연구제안의 최종 성과물 중 하나인 라이프라인시스템 네트워크 지도는 이와 같은 도시 복원력 판단을 위한 기술적 기반으로써 재난 이후 연쇄피해로 인한 공공 서비스 저하를 효과적으로 확인할 수 있을 것임.
- 따라서 특정 지진 하중에 대한 구조체 변위 등 직접적인 피해 평가를 기반으로 하는 **구조적 재난대응과 더불어 지역단위 네트워크 지도를 개발하고 기능 저하를 예측하는 기능적 재난대응으로 확장**을 도모한 연구 결과가 될 수 있음.



[그림 38] 네트워크 기반 지역 단위 재난 대응으로의 확장

❑ 최종 수요자 중심의 재해 진단 분석 시도

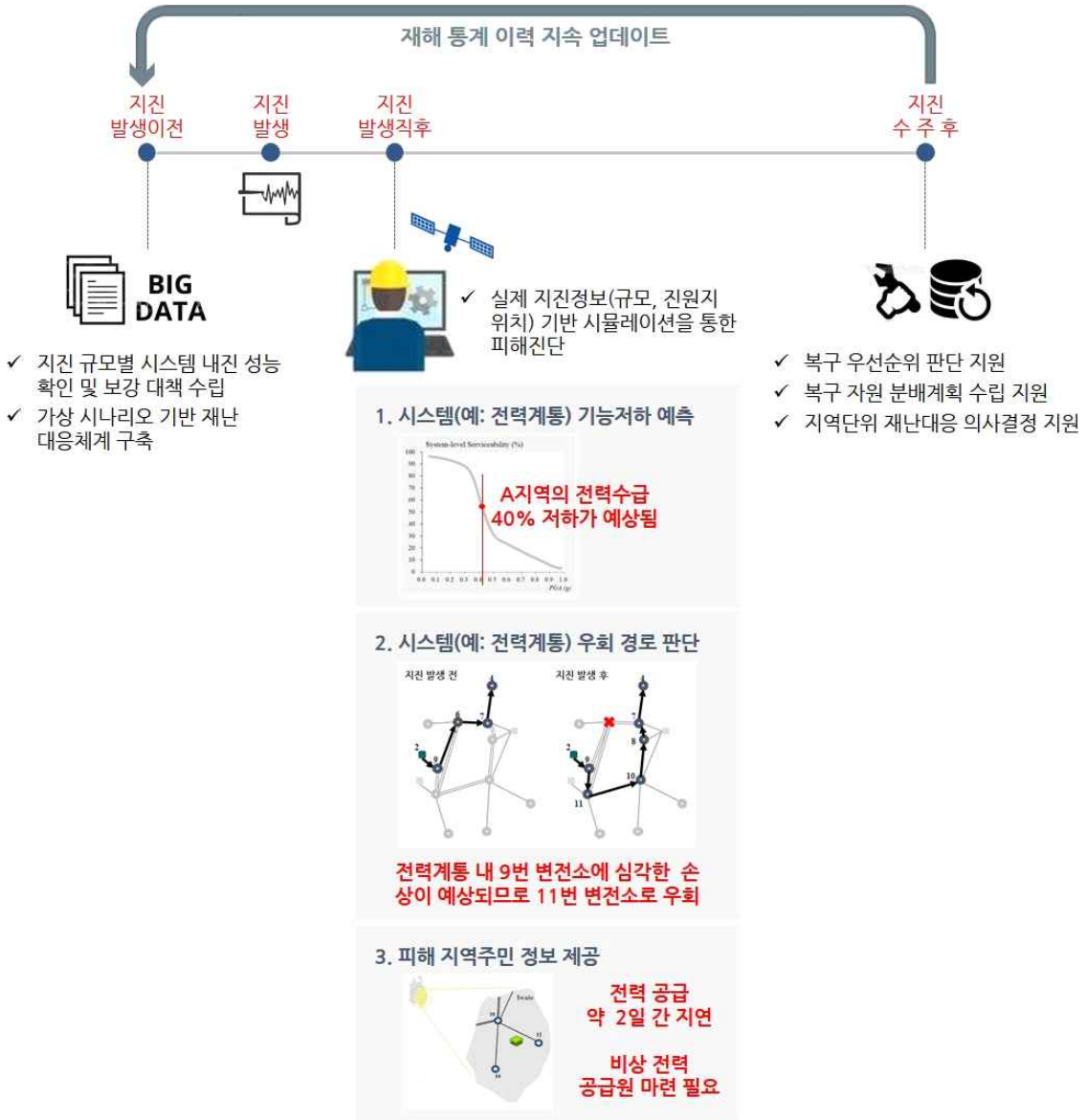
- 국민편의제공을 목적으로 하는 라이프라인시스템의 재해 진단은 그 방향에 맞게 최종 수요자 중심으로 이루어져야 할 필요가 있음.
- 그러나 **현행의 재해 진단은** 시설물 파괴로 인해 얼마만큼의 경제적 피해가 발생했는지, 해당 손상을 복구하기 위한 비용은 얼마인지 등 **사유시설과 공공시설을 구분하지 않은 공급자 중심의 시각에서 제한적으로 접근**되고 있는 것이 사실임.
- 그렇기 때문에 재난 발생 이후 정부 유관기관이 다양한 노력을 기울임에도 불구하고 **실질적으로 재난 피해 주민들이 궁금해 할 수 있는 항목**, 예를 들어 전기 공급은 언제 될 것인지, 인근 지역의 복구공사는 언제 시작할 것인지 등에 대하여 **답을 할 수 없는 상황**이며 이로 인해 재난대응체제에 대한 불만족으로 이어질 수 있음.
- 따라서 수요자 중심 대응 체제로 전환하고 있는 해외 방재 선진국과 같이 우리나라 또한 라이프라인시스템과 같은 공공시설에 적합한 재해 진단 도구가 필요한 상황임.
- 이에 본 연구는 **라이프라인시스템의 서비스제공가능도를 정의**하고, 지진취약도 곡선과 연쇄 피해수형도를 기반으로 **지진 재해 기능저하 예측모델을 개발하여 최종 수요자 중심의 재해 진단 분석을 시도**함으로써 혁신적 의의를 가짐.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

5-1. 연구개발성과의 활용방안

❑ 라이프라인시스템 재난대응 분야 기술 성숙도 향상

- 본 연구는 지진재해로 인한 라이프라인시스템 기능저하의 개념을 정립하고 피해진단 예측 모델을 개발함으로써 현재 **국내의 관련 기술 인프라를 아이디어 형성 단계인 TRL 2단계에서 핵심 기능 및 모듈체계 구성을 완료하고 실험실 환경에서 테스트 결과를 분석하는 TRL 4단계로 성숙**시키는 것을 목표로 함.
- 이에 본 연구진은 라이프라인 특성 DB, 네트워크 지도, 최대지반가속도 추정 함수, 손실예측함수 등을 포함한 개별 요소기술 개발을 연구 1차년도에 완료하고 해당 모듈을 종합한 라이프라인 네트워크 지진재해 기능저하 예측 모델을 연구 2차년도에 개발하였음.
- 또한 연구 2차년도에는 개발된 모델을 정성적으로 검증하는 방안과 개발 모델을 활용하여 라이프라인 네트워크의 강건성을 확보하는 방안을 제시하였음.



[그림 39] 재난 진행단계별 본 연구성과물의 활용방안

- 특히 본 연구의 최종 개발 모델은 지진 이후 전기, 수도 등 공공 서비스의 재개 시점을 예측하여 최종수요자 입장에서의 재난대응 정보 제공을 지원하였는데, [그림 39]는 A 지역 내 지진 상황을 가정하고, **본 연구가 지진 발생 이전, 발생 직후, 발생 수 주 후 각각 어떻게 활용될 수 있는지 예상 시나리오**를 나타낸 것임.
- 구체적으로, 본 연구의 최종 성과물은 **지진 발생 직후에 그 활용성이 가장 높음**. 예를 들어, 기상청 등 유관기관에 지진 정보가 계측되면 지진 규모, 진원지 위치 등을 기반으로 특정 지역 내 라이프라인시스템의 피해 진단 시뮬레이션을 수행하게 됨.
- 이를 통해 **전력계통의 경우 전력 수급이 얼마나 저하되는지 예상**할 수 있으며, 네트워크 지도를 기반 하기 때문에 임의의 변전소가 심각하게 손상될 것으로 판단된다면 전**력 공급을 위한 우회 경로를 제안**할 수 있음.
- 또한 피해지역주민들에게 현재 지진으로 인하여 전력공급이 얼마나 지연될 것인지를 고지하고, 지자체별 수급이 필요한 비상전력 규모 정보를 제공함.
- 이와 같은 **최종 수요자 중심의 재해 진단 분석은 향후 실제 재난 피해지역으로의 적용 용이성을 높이며 지역 주민 스스로 안전관리 활동에 능동적으로 참여할 수 있도록 함**.
- 예를 들어 시스템의 사용자는 분석하고자하는 지진의 위도, 경도, 깊이, 규모 정보의 입력을 통해 가상의 지진 시나리오에 대한 개별 구성요소의 위험도를 평가할 수 있음.
- 이때 특정 지진에 의하여 피해가 예상되는 구성요소가 있다면, **지진발생 이전에도 보강대책을 수립할 수 있게 되며**, 지진 당시 기록된 재해 통계 이력을 시스템 내 DB에 지속 업데이트하면 향후 재해 대응의 판단 지표로도 활용 가능함.

❑ 관련 분야 연구 활성화 기반 마련

- 미국 국제 산업시장조사기관인 The Freedonia Group 보고에 따르면, 세계 안전 서비스 시장의 규모는 2016년 기준 국내 약 21 억 달러, 세계 약 1,163 억 달러에 달하며, 향후 2021년까지 기술 수요가 꾸준히 증가할 것으로 예상됨.
- 이와 같은 상황에서 지역단위 공공서비스의 공급연속성을 예측하는 본 연구는 **기존 구조 진단 예측 분야에 집중되었던 안전서비스 관리 시장을 기능저하 및 도시복원력 확보 분야까지 확장시켜 관련 소프트웨어 분야 신규 시장을 창출**함.
- 또한 향후 경상북도 일부 지역이 아닌 전국 범위 라이프라인시스템 네트워크 지도를 시범 개발하기 위해 방대한 양의 지역정보 (예: 지형, 전력계통도, 전력수요 등)를 피해 진단예측 모듈과 연동하는 표준 구조를 제공하여 현실적이고 지속성 있는 국가개발 R&D 연구 투자를 도모함.
- 뿐만아니라 본 연구는 **논문, 특허 등 다양한 학술적 기술적 성과를 통해 지역 단위 재난 대응 연구자 및 연구단체, 사회기반시설물 안전 연구자 및 연구단체에서 활용 가능한 테스트 모델을 제안**함으로써 향후 실용화를 위한 추가 연구 활성화를 지원함.
- 이를 통해 건설 분야 뿐 아니라 재난 관리 분야의 **유관기관 연구진들에게 연구 협력과 융합의 통로 역할을 수행**할 수 있었음으로 사료되며, 특히 전력계통 피해 예측모델과 관련하여 활용성을 인정받아 해외의 관련 연구자들 또한 충분히 기초 자료로써 활용 가능한 기반이 될 수 있을 것으로 예상됨.

5-2. 기대효과

❑ 기술적 측면

- 정부는 2015년 제 7차 무역투자진흥회의를 통해 국가기반시설을 대상으로 현재 구축된 재난대응 소프트웨어의 기능성, 상호운용성, 신뢰성을 점검하고 재난 예측 및 대응 분야의 공통 플랫폼 기술을 확보하겠다고 밝힘.
- 본 연구의 핵심성과 중 하나인 **국내 주요 라이프라인시스템 네트워크 지도는** 현재 개별 시설물 단위의 GIS를 기반으로 하고 있는 피해 진단 예측 도구와 달리 구성요소 간 연결 경로를 기능적, 위치적, 복원적 개념으로 반영한 라이프라인시스템의 지진 피해 예측 및 재난대응지원을 목적으로 하고 있기 때문에 위와 같은 **공통 플랫폼 확보 기반 마련의 일환**이라고 할 수 있음.
- 또한 네트워크 지도의 개발과 더불어 본 연구 제안은 단일 시스템이 아닌 서로 다른 라이프라인 시스템의 연쇄 피해를 고려함으로써 현재 분산되어 유지 관리되고 있는 한국전력공사, 한국 수자원공사 등 **다양한 분야의 후속 연구기관과의 유기적인 협력체계를 구성할 수 있는 기술적 기반**을 마련함.
- 뿐만 아니라 국가공간정보포털 제공 DB 등에서 제공한 시설물 정보와 GIS 위치 정보, HAZUS에서 제공하는 지진 이력 정보 등 다양한 데이터 속성의 표현 방식을 통일하고 호환성능을 분석함으로써, **향후 데이터 속성을 변경하거나 사용가능한 데이터 유형을 분류하고 한정하는 방법으로 확장 적용시킬 수 있는 원천기술을 확보**함.
- 요약하자면, 본 연구 제안은 공공 데이터의 적극 활용과 라이프라인시스템 재난대응의 표준 네트워크 지도 마련을 통해 재난 초동대응체계 구축을 지원하고 라이프라인시스템 관리 유관기관 간 업무연계시스템의 재정비의 기술적 지원을 수행함.

❑ 경제·산업적 측면

- 재난 이후 신속한 피해진단 및 지역단위 대응체계 구축은 관련 의사결정 지연으로 인한 공공서비스 공급 중단과 같은 2차 피해를 막고, 관련 소요 비용을 절감할 수 있도록 함.
- 특히 본 연구제안은 국내 라이프라인시스템의 **피해 분석 및 구조 진단 시간을 단축하고, 시설물 복구 공정을 개선**하여 재난대응계획 수립 지연을 최소화하기 위한 유용한 정보를 제공할 수 있음.
- 실제로 본 연구를 제안하기에 앞서 동일본 대지진 당시 Iwate 지역을 대상으로 선행 분석을 시행한 결과에 따르면 재난대응(복구) 공정 지연이 약 9주가량 개선되고, 재난대응(복구)비용의 약 11.4%가량 절감이 예상되었음.
- 또한 본 연구는 현재까지 국내에서 피해 사례가 비교적 적은 지진 피해의 통계이력 관리 및 공공서비스저하 예측방안을 제시함으로써, 구조진단 또는 사후대응 중심의 현행 재해 진단도구의 한계를 보완하고, 지역단위의 방재역량강화를 도움.
- 뿐만 아니라 본 연구진은 방재, 건설, 컴퓨터 공학 학계 연구진을 대상으로 정기적인 자문을 수행하고 풍부한 선행연구결과를 기반으로 연구를 진행함으로써 **연구결과와 현실 간의 괴리를 줄이고 실용화 가능성이 높은 활용방안을 도출하여 막대한 자원이 투입되는 국가차원 재난관리체제의 신뢰성을 제고**하고자 함.

- 이 밖에도, 미국 국립건물과학연구소(National Institute of Building Sciences)에서는 사고 예방에 1$ 투자 시 약 3.65$의 사고 예방 효과가 있다 주장하므로, 이를 본 연구에 투자된 연구개발비용(320,000,000원)을 기준으로 산정한다면 총 1,168,000,000원의 사고 예방 효과가 있을 것으로 추정할 수 있음.

❑ 학술적 측면

- 본 연구는 첨단 IT와 방재, 건설기술을 융합한 연구를 수행할 수 있는 다수의 전문가를 요구함. 따라서 본 연구는 **변화된 재난환경에 대응하는 맞춤형 전문 인력을 양성하고, 재난정보의 공동 활용체계를 구축하는데 이바지**함.
- 즉 핵심기술인 네트워크 지도 작성 기술, 구성요소 지진취약도 평가기술, 피해파급 및 네트워크 기능저하 진단기술, 시각화 기술 등을 보유한 전문가의 양성은 현재 개별 시설물 단위의 재난대응을 선진국형 지역단위 대응체제로 바꿀 수 있는 기반이 되며 이를 통해 국가 경쟁력 강화에 기여함.
- 또한 본 연구를 수행하는 과정에서 국외 SCI급 학술지 게재 2건, 국내 KCI급 일반 학술지 1건을 성과로 달성하였으며, 2건의 국외 학술발표 대회 참석 및 발표를 수행하는 성과를 거두어 **라이프라인시스템 네트워크 지도 개발 및 피해 진단 예측 모델 개발 분야의 연구를 선점**하였음.
- 특히 본 연구개발 결과물을 바탕으로 **"전력계통의 지진 피해 예측 방법 및 시스템(등록번호 10-1930174)"**에 대하여 국내 특허 등록을 성공적으로 수행하였으므로, 본 연구는 국내외 통상의 지식을 가진 사람이 쉽게 발명할 수 없는 난이도를 갖추었으며(신규성), 본 연구를 통해 관련 산업의 발전에 이바지할 수 있음(산업상 이용 가능성)이 입증되었음.

5-3. 추가연구 필요성

- 본 연구는 전력 및 상수도 네트워크를 대상으로 지진에 대한 공통원인피해와 연쇄피해 발생을 예측하고, 지진 재해를 완화시킬 수 있는 방안을 제안함으로써 연구 계획 단계에서 설정한 목표를 성공적으로 달성하였음.
- 그러나 현재 연구 분석범위의 경우 지역은 국내 대구, 경북에 한정되어 있고, 피해는 주요 거점시설인 발전소, 변전소, 정수장, 저수탱크, 가압장에서만 발생한다고 가정하고 있기 때문에 다음과 같은 추가 연구를 통해 본 연구 성과의 적용을 한 단 계 넓힐 필요가 있음.

1) 센싱을 통한 라이프라인 네트워크 링크 피해파급 예측

- 본 연구에서는 주요 재난 유형을 지진으로 설정하고, 지진동으로 인한 최대지반가속도를 기반으로 피해를 예측하고 있음.
- 이에 향후 후속연구에서는 태풍, 홍수 등 다양한 재난 유형으로 확장할 필요가 있는데 특히 <u>센서 기술을 활용하는 경우 지진으로 인한 구조물의 수평 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있을 뿐만 아니라 태풍으로 인한 라이프라인 네트워크 송·배전선로 및 송·배수관로의 단선을 파악하여 준 실시간의 피해 예측을 수행</u>할 수 있을 것임.

[그림 40] 후속 연구로의 확장 방안

2) 지진 이후 라이프라인 서비스의 수요 변화 패턴 예측

- 라이프라인 네트워크의 강건성 예측의 불확실성을 증가시키는 요인으로는 본 연구에서 이미 기술한 공통 원인 피해와 연쇄피해 뿐만 아니라 <u>비 일반적인 상황으로 인하여 수요가 급격하게 증가하거나 감소하는 경우</u>도 있음.
- 예를 들어, 재난 상황에서는 재난 이전과 비교하여 복구 작업이 증가하기 때문에 건설 기계 가동으로 인해 전력 수요가 일시적으로 증가할 수 있음.
- 동시에 정부차원에서의 의도적인 절약 운동으로 전력 수요는 감소할 수도 있는데, 2011년 동일본대지진 당시의 “Setsuden” 운동이 그 대표적인 예임.
- 따라서 본 연구의 후속 연구로써 System Dynamics와 같이 수요-공급의 변화를 다루는 방법론을 활용하여 1차적인 공통원인피해가 연쇄피해를 거쳐 다시 원인으로 돌아오는 증폭 피해까지 다룰 필요가 있음.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 본 연구진은 재난 피해 예측 및 시설물 관리 분야의 해외 선진 기술을 습득하기 위하여, 국외 학술발표대회에 참석하였으며, 동시에 본 연구의 개발 성과의 발표를 통해 연구 타당성을 확인하고 보완방향에 대한 의견을 반영하였음.
- 구체적으로 연구 1차년도에 참석한 International Workshop on Computing in Civil Engineering은 미국 토목학회 ASCE에서 주관하는 국제학회(2017년 6월, Seattle, WA)로 여러 국가에서 온 연구자들의 발표를 들을 수 있는 Parallel Session 및 Workshop Program이 다양하게 준비되어 있었음.
- 따라서 본 연구와 관련한 유용한 정보들을 획득할 수 있는 좋은 기회가 되었는데 **특히 Parallel Session 1A에서는 "Infrastructure Monitoring, Control and Analysis"를 주제로 7명의 연구원 발표가 진행되었으며 향후 본 연구의 진행과정에서 참고 될 수 있는 좋은 자료**가 되었음.
- 또한 본 연구과제와 관련하여 "Agent-based Inoperability Input-Output Model for the Seismic-Damaged Infrastructure Loss Estimation" 라는 논문을 제출하였고 이 논문을 Poster Session에서 발표하여 학회에 참석한 다른 연구자들과 함께 주제와 관련하여 논의할 수 있는 시간을 가졌음.
- 연구 2차년도에 참석한 International Conference of the System Dynamics Society는 System Dynamics 연구방법론과 관련하여 가장 권위 있는 국제학회(2018년 8월, Reykjavik, Iceland)임.
- 특히 Poster Symposium에서 본 연구진은 "Robustness Estimation of the Seismic-Damaged Electric Power System in the Context of Failure Propagation"을 주제로 발표를 진행하여 **현재의 연구 개발 모델에 대하여 다양한 Feedback을 받았고 더 나은 방향으로 수정 보완할 수 있게 되었음**.

[그림 41] 2018 ISDC 학회 참석 및 발표

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제24조의 4 제1항에 해당하지 않음	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황

- 해당 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

가. 연구실 안전조치 이행계획

- 해당 없음

나. 유전자변형생물체(LMO) 연구시설 및 수입 신고 현황

- 해당 없음

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부	특기 사항
1	논문	Damage Propagation from Component Level to System Level in the Electricity Sector	서울대	주 저자	Journal of Infrastructure System, ASCE	1.516	2018.07.05	단독	SCI
2	논문	Effect of Dynamic Emergency Cues on Fire Evacuation Performance in Public Buildings	서울대	주 저자	Journal of Infrastructure System, ASCE	1.516	2018.08.29	단독	SCI
3	논문	피해파급에 대한 고찰을 통한 전력 및 상수도 네트워크의 강건성 예측	서울대	주 저자	한국건설관리학회 논문집	-	2018.05.31	단독	KCI
4	논문	Agent-based Inoperability Input-Output Model for the Seismic-Damaged Infrastructure Loss Estimation	서울대	주 저자	Proceedings of the International Workshop on Computing in Civil Engineering	-	2017.06.25. (Seattle, Washington)	단독	국외학술발표
5	논문	Robustness Estimation of the Seismic-Damaged Electric Power system in the Context of Failure Propagation	서울대	주 저자	Proceedings of the International System Dynamics Conference	-	2018.08.06. (Reykjavik, Iceland)	단독	국외학술발표
6	특허	전력계통의 지진 피해 예측 방법	서울대	발명자	한국	-	출원 2017.11.28.	단독	출원번호: 10-2017-0160443
							등록 2018.12.11	단독	등록번호: 10-1930174
7	SW	라이프라인 네트워크 연쇄피해 예측 프로그램	서울대	발명자	한국	-	등록 2017.11.02	단독	등록번호: C-2017-026647
8	SW	대구·경북지역 라이프라인 네트워크 지도	서울대	발명자	한국	-	등록 2018.09.12	단독	등록번호: C-2018-024578
9	SW	라이프라인 피해파급 예측을 위한 베이지안 모형	서울대	발명자	한국	-	등록 2018.12.27	단독	등록번호: C-2018-040042

Damage Propagation from Component Level to System Level in the Electricity Sector

Seulbi Lee, S.M.ASCE[1]; Sungjoo Hwang, A.M.ASCE[2]; Moonseo Park, A.M.ASCE[3]; and Hyun-Soo Lee, A.M.ASCE[4]

Downloaded from ascelibrary.org by SEOUL NATIONAL UNIVERSITY LIB on 07/26/18. Copyright ASCE. For personal use only; all rights reserved.

Abstract: In the aftermath of an earthquake, the electric power supply system may have a reduced ability to maintain its intended function, leading to service disruptions of other interdependent facilities until the electricity sector gets restored. In order to analyze such extra functionality losses, the authors have developed an agent-based inoperability input-output model with a focus on damage propagation from a component level to a system level in the electricity sector. In addition, this research presents the probabilistic matrix for the quantification of correlation coefficients between two connected electricity sector components (e.g., power generator and deliverer) and uses these coefficients to identify critical components from a perspective of the network's reliability. The developed model thus allows us to understand how a degradation of component affects the functionality of the whole electricity sector. To demonstrate the model's analytic capability, this research conducted case simulations using the data from 2011 Tohoku earthquake. The simulation results show that the impact of seismic damage in a network is generally underestimated because there is unforeseen damage propagation from the component to the system level. Moreover, the results demonstrate that demand-side efforts to conserve electricity usage and restoration priority setting in accordance with component criticality are crucial to ensure community resilience in case of disaster. **DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000437.** © *2018 American Society of Civil Engineers.*

Author keywords: Electricity sector; Power system; Functionality; Earthquake; Input-output inoperability; Agent-based simulation.

Introduction

Civil infrastructure systems, which are often referred to as lifeline systems, produce and provide public services such as electric power, water, and fuel to local residents. However, in the case of a disaster event, the damaged lifeline systems can produce functional losses until they get restored (Barker and Haimes 2009). Disruptions in the electricity sector, in particular, can lead to malfunctions in the other interdependent lifeline systems and critical facilities that depend heavily on electric power (McDaniels et al. 2007; Chang et al. 2009; Johansson and Hassel 2010). Furthermore, even if only a part of the electricity sector (e.g., power plant and transmission substation) is damaged, its impact on the whole system can be catastrophic (Castillo et al. 2014). In the 2010 Chile earthquake, for example, the Central Interconnected System, which serves electricity to 93% of the Chilean population, sustained damage to its generation, transmission, and distribution components immediately after the earthquake. The earthquake also produced a blackout of 4,522 MW out of a peak demand of 6,145 MW (Araneda et al. 2010). Most generation and transmission facilities were able to operate within a few hours of the event, whereas restoration at the distribution level took up several days, and this event resulted in power supply delay for a week (De la Llera et al. 2017).

As such, component-failure-induced system disturbance commonly happens in the electricity network after an earthquake. Therfore, the question the authors address in this paper is how the damage of individual component would propagate and to quantify its effect on the whole system performance. However, it is difficult to determine which components are more important to system reliability improvement or offer a greater contribution to the network performance than other components (Zio and Golea 2012; Hernandez-Fajardo and Dueæas-Osorio 2013). This is because (1) the electricity sector consists of many components that are spatially distributed and complexly interdependent (Dunn and Wilkinson 2013); and (2) these components may sustain different levels of damage when subjected to a disaster event (Dialynas et al. 1988; Chang and Wu 2011). The performance of the electricity sector, in other words, depends not only on the physical damage of each component but also on the interactions among interdependent components (Frangopol and Saydam 2011).

In this context, many researchers have offered useful indices to measure a component's importance and have developed cascading failure analysis models to estimate the degraded performance of the whole system. The CASCADE model (Nedic et al. 2006) and OPA model (Qi et al. 2015) are typical methods to show the patterns of cascading blackout in line with the electricity load growth. These load-dependent models assume that once there is no power flow through a damaged component, then a second one suffers overload and subsequent self-redispatches. However, in the postearthquake event, it is difficult to compute optimal configuration because multiple components at different origins go out of service concurrently (Dobson et al. 2008). On the other hand,

[1]Ph.D. Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea 08826. Email: lee130@snu.ac.kr

[2]Assistant Professor, Dept. of Architectural and Urban Systems Engineering, Ewha Womans Univ., 52 Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul, Korea 120-750. Email: hwangsj@ewha.ac.kr

[3]Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea 08826 (corresponding author). Email: mspark@snu.ac.kr

[4]Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea 08826. Email: hyunslee@snu.ac.kr

Note. This manuscript was submitted on March 7, 2017; approved on March 30, 2018; published online on July 5, 2018. Discussion period open until December 5, 2018; separate discussions must be submitted for individual papers. This paper is part of the ***Journal of Infrastructure Systems***, © ASCE, ISSN 1076-0342.

Effect of Dynamic Emergency Cues on Fire Evacuation Performance in Public Buildings

Minji Choi[1]; SangHyun Lee, M.ASCE[2]; Moonseo Park, A.M.ASCE[3]; and Hyun-Soo Lee, A.M.ASCE[4]

Downloaded from ascelibrary.org by SEOUL NATIONAL UNIVERSITY LIB on 09/20/18. Copyright ASCE. For personal use only; all rights reserved.

Abstract: An individual's perceived risk is an important source for determining responses during a fire evacuation. The level of perceived risk is continuously influenced by an interpretation of the updated emergency information from the surroundings. In this regard, this research aims to model and analyze the effect of perceived risk that changes from observing dynamic emergency cues (i.e., information from the fire itself, other occupants, and facility emergency systems) on evacuation behaviors in public building fire situations using an agent-based modeling approach. The simulation results highlight the difference in the effect of dynamic emergency cues on evacuation performances based on the type of emergency cues and facility layout. In addition, the result emphasizes the necessity of considering the side effects of dynamic emergency cues on the evacuation performance. Using the developed model, this research provides insights into the appropriate use of dynamic emergency information considering the extended influence of perceived risk on evacuation performance. **DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000449.** *© 2018 American Society of Civil Engineers.*

Introduction

Unexpected fires can occur in any facility and threaten people's lives. For example, in 2016, a building fire was reported every 64 s and the fires caused more than 15,700 casualties in the United States (NFPA 2016). For individuals' survival during such events, it is critical for people to take appropriate emergency actions or, in other words, perform timely evacuations (Purser and Bensilum 2001; Kobes et al. 2010).

During fire evacuations, an individual's perceived risk, which is established as a result of an individual's subjective evaluation on the probability of being negatively influenced by imminent danger (Kinateder et al. 2015), plays an important role for making behavioral decisions. Evacuees are more likely to take protective actions or to make evacuation decisions if they perceive a higher risk about an ongoing situation (Kuligowski and Mileti 2009; Kuligowski 2011; Sherman et al. 2011; Gershon et al. 2012; Kinateder et al. 2015). In addition, people tend to adjust their subsequent behaviors to a more active (e.g., rush toward an exit) or more passive (e.g., investigate what is going on or continue previous work) manner according to the perceived situation (Helbing et al. 2000; Heliövaara 2007; Kinateder et al. 2015). Therefore, it is of great importance to understand the role of perceived risk for predicting evacuees' behavior and evacuation performance (Kuligowski and Mileti 2009; Kuligowski 2011; Kinateder et al. 2015).

Perceived risk is a direct consequence of obtained information from the surroundings and an individual's personal attributes (Dash and Gladwin 2007). During a suspected fire situation, people continuously search for additional information from various sources such as the fire itself, other occupants, or facility emergency systems to evaluate the risk of the ongoing situation (Withey 1962; Kobes et al. 2010; Gwynne 2012). The newly updated information on the situation can continuously change the individual's level of perceived risk and subsequent responses; for example, to continue to evacuate or not. Compared to some static factors that influence an individual's perceived risk such as gender, age, and previous experience (Sime 1983; Kobes et al. 2010; Kuligowski 2011; Kinateder et al. 2015), these types of additional information are considered as dynamic because the contents or intensity of the information can change over time during an emergency (Kinateder et al. 2015).

In addition, large public buildings such as sports halls, stadiums, airports, and shopping malls are filled with visitors (Lee 2012). The high occupancy requires a more accurate understanding of crowd behavior and prediction of evacuation performance to better guide the people to a place of safety in case of an emergency (Chu and Yeh 2011; Lee 2012). It should be also noted that the visitors are often not familiar with the emergency evacuation procedures of a facility they have never visited before. In this situation, people are highly dependent on emergency cues such as others' responses and notifications from the facility for evaluating the situation and deciding their subsequent actions.

With this background, this research aims to model and analyze the effect of perceived risk that changes from dynamic emergency information (i.e., from the fire itself, other occupants, and facility emergency systems) on evacuation behavior and performance in public buildings. Agent-based modeling is used to build an evacuation model in which each agent establishes a perceived risk according to the observations of the surroundings and makes autonomous decisions for subsequent behaviors during an evacuation. In order to incorporate the effect of smoke on evacuees' perceived risk, the Fire Dynamics Simulator (FDS) is linked to the developed evacuation model to transfer the visibility data of the simulated area. A number of simulation scenarios are tested in both open-space and complex

[1]Postdoctoral Fellow, Dept. of Building and Real Estate, Hong Kong Polytechnic Univ., 11 Yuk Choi Rd., Hung Hom, Kowloon, Hong Kong. Email: minji.choi@polyu.edu.hk

[2]Associate Professor, Tishman Construction Management Program, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Michigan, 2350 Hayward St., Suite 2340 G.G. Brown Bldg., Ann Arbor, MI 48109 (corresponding author). Email: shdpm@umich.edu

[3]Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Suite 425 Bldg. #39, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea. Email: mspark@snu.ac.kr

[4]Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Suite 425 Bldg. #39, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea. Email: hyunslee@snu.ac.kr

Note. This manuscript was submitted on May 30, 2017; approved on May 11, 2018; published online on August 29, 2018. Discussion period open until January 29, 2019; separate discussions must be submitted for individual papers. This paper is part of the ***Journal of Infrastructure Systems***, © ASCE, ISSN 1076-0342.

3) 논문 (KCI급 게재)

KJCEM 19. 3. 033~042
May 31, 2018

www.kicem.or.kr (pISSN 2005-6095 / eISSN 2465-9703)
http://dx.doi.org/10.6106/KJCEM.2018.19.3.033

피해파급에 대한 고찰을 통한 전력 및 상수도 네트워크의 강건성 예측

이슬비[1] · 박문서* · 이현수[1]
[1]서울대학교 건축학과

Robustness Estimation for Power and Water Supply Network : in the Context of Failure Propagation

Lee, Seulbi[1], Park, Moonseo*, Lee, Hyun-Soo[1]
[1]Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

Abstract : In the aftermath of an earthquake, seismic-damaged infrastructure systems loss estimation is the first step for the disaster response. However, lifeline systems' ability to supply service can be volatile by external factors such as disturbances of nearby facilities, and not by own physical issue. Thus, this research develops the bayesian model for probabilistic inference on common-cause and cascading failure of seismic-damaged lifeline systems. In addition, the authors present network robustness estimation metrics in the context of failure propagation. In order to quantify the functional loss and observe the effect of the mitigation plan, power and water supply system in Daegu-Gyeongbuk in South Korea is selected as case network. The simulation results show that reduction of cascading failure probability allows withstanding the external disruptions from a perspective of the robustness improvement. This research enhances the comprehensive understanding of how a single failure propagates to whole lifeline system performance and affected region after an earthquake.

Keywords : Lifeline system, Network robustness, Failure Propagation

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 잇따른 지진으로 인해 국내에서도 대규모 자연재해에 대한 불안심리가 고조됨과 동시에 지진상황에서 사회기반시설의 공공서비스 공급 지속성 확보방안이 화두가 되고 있다. 이에 정부는 사회기반시설 관련 예산 투자 방향을 신규 시설 건설에서 유지보수와 안정성확보 측면으로 전환하였으며, 지난 2016년 9월 경주 지진 직후에는 영남지역에 위치한 5,312개 사회기반시설에 대하여 내진성능 점검을 수행하였다.

그러나 전력, 가스, 상하수도 등 사회기반시설 가운데 광범위한 지역에 분산된 네트워크적 특성을 갖고 있는 라이프라인 시스템(Lifeline System)의 경우 재난 발생 이후에 직접 현장을 방문하여 손상을 평가하는 것은 막대한 시간과 비용이 소요된다(Zio & Piccinelli, 2010; Dunn & Wilkinson, 2013). 실제로 2015년 4월 네팔 지진 당시 사망자 또는 붕괴된 주택 수의 경우 지진 발생 이후 수주 이내에 집계된 반면 라이프라인 시스템 손상으로 인한 정전 피해나 식수 제한 등 공공서비스의 지연은 파악에 어려움이 있었다(Goda et al., 2015). 라이프라인 시스템의 피해 진단을 위해서는 구조물이 얼마나 무너졌는가의 물리적 손상(Physical Damage)이 아닌, 시스템이 의도로 했던 서비스를 제공할 수 있는 능력이 얼마나 감소되었는가의 기능적 저하(Functional Loss)로의 접근이 필요하기 때문이다(Kawakami, 1990).

이러한 배경에서 재난 이전 보통의 상태에서 서비스 공급량을 100%로 기준하여 기능저하를 판단하는 개념인 서비스제공가능도(Serviceability)가 등장했다. 미연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency, FEMA)에서 개발한 지진 취약도 함수가 서비스제공가능도 측정의 대표적 예이다. 그러나 이때의 서비스제공가능도는 구조물이 단독으로 기능을 수행한다고 가정하고 있기 때문에 여러 개의 구조물(예: 발전소, 변전소 등)이 하나의 목적을 갖고 전체 시스템(예: 전력계통)의 부분으로서 역할을 하는 경우 같은 네트워크 안에 있는 구조물들과의 상호의존성(Internal

* Corresponding author: Park, Moonseo, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea.
E-mail: mspark@snu.ac.kr
Received October 19, 2017; revised December 19, 2017
accepted December 20, 2017

4) 논문 (국외 학술 발표)

Agent-based Inoperability Input-Output Model for the Seismic-Damaged Infrastructure Loss Estimation

Seulbi Lee[1]; Moonseo Park[2]; Hyun-Soo Lee[3] and Bogyeong Lee[4]

[1]Ph.D. Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea; PH(82)2-880-8311; email: lee130@snu.ac.kr
[2]Professor, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea; PH(82)2-880-8311; email: mspark@snu.ac.kr
[3]Professor, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea; PH(82)2-880-8311; email: hyunslee@snu.ac.kr
[4]Ph.D. Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea; PH(82)2-880-8311; email: itwillfly22@gmail.com

Keywords: Infrastructure; Earthquake; Damage Estimation; Agent-based Model; Inoperability Input-Output Model

EXTENDED ABSTRACT

In the aftermath of an earthquake, seismic-damaged infrastructure loss estimation is the first step towards the emergency response. In this context, several damage estimation methods have been proposed such as fragility curves by FEMA (2011). It should be noted, however, that these types of methods are not sufficient to quantify the loss of infrastructure inoperability from the degraded whole system performance. This is because: (a) they generally offer the probability of physical destruction for single infrastructure and (b) the ability to supply intended service can be volatile by external factors such as disturbances of nearby infrastructures, and not by own physical issue. To address these issues, this research proposes an agent-based inoperability input-output (IIM) model that estimates the component and system-level inoperability within an infrastructure network. In addition, through this model, we observe how a single component's damage propagate to whole infrastructure system performance after an earthquake. The electric power network in Tohoku region, Japan subjected by 2011 Tohoku earthquake is selected for case simulation, and each component (e.g., power station and distribution substation) in the network is modeled as an agent that has its own attributes (e.g., intended function, geographical coordinate and link connectivity). The upper left side of Fig. 1 shows simplified topological structures of the Tohoku electric power network. Regarding this figure, there are 3 thermal power plants and 11 major substations connected by 24 bidirectional/one-way transmission links. Theoretical background of inoperability estimation for such agents is based on IIM developed by Haimes and Jiang (2001). Consequently, this research introduces new correlation matrix, the core concept of the IIM, to quantify the conditional probability of cascade failure (where one damage triggers another service disruptions). Detailed inoperability estimation algorithms as shown in the right side of Fig. 1. When the simulation starts, the model triggers a single seismic event with magnitude 9.0 and depth of earthquake center about 24km. Then inoperability in two perspectives are immediately determined by the ground motion intensity and correlation coefficients. The simulation results show that the agent's component-level inoperability represents from 7.5% to 93.3% (all agents have 0% inoperability before the earthquake). To be

Robustness Estimation of the Seismic-Damaged Electric Power System in the Context of Failure Propagation

Seulbi Lee[1], Moonseo Park[2] and Hyun-Soo Lee[3]

[1] Ph.D. Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 151-742, Korea; email: lee130@snu.ac.kr

[2] Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 151-742, Korea; email: mspark@snu.ac.kr (*Corresponding Author)

[3] Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National Univ., 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 151-742, Korea; email: hyunslee@snu.ac.kr

Abstract

During a disaster, it is common that infrastructures encountered problems in maintaining reliable operation because each sub-sector can be counted as a hazard source. Moreover, a single failure of a sub-sector can readily propagate to same and/or different infrastructure systems. For example, electricity supply from distribution substation influencing the operation of the connected water treatment plant. Excess demand for public services from infrastructure and mandatory demand reduction in the abnormal condition also makes challenges to estimating infrastructure system behavior. In this context, it is required to discuss system performance under supply chain disruptions and demand fluctuation. This research aims, therefore, to determine the possible factors driving uncertainty in robustness estimation. In addition, this research develops causal loop diagrams that examined the progress of failure in an infrastructure and robustness estimation model using system dynamics. Case simulation based on the power system in Daegu city in South Korea is also conducted. The results of this study can provide a better understanding of how a failure propagates to the whole system and how the change of supplier and customer-side variables affect the system robustness.

Keywords: Robustness, Reliability, Electric Power System, Earthquake.

Body of Paper

Introduction
Theoretical Background
Model Development
Model Behavior Test
Conclusions
Acknowledgements
References

6-1) 특허 (출원)

2017-11-27

【서지사항】

【서류명】	특허출원서
【참조번호】	SNU20170999
【출원구분】	특허출원
【출원인】	
【명칭】	서울대학교산학협력단
【특허고객번호】	1-2007-050924-2
【대리인】	
【성명】	이창재
【대리인번호】	9-2015-001621-9
【대리인】	
【성명】	서상덕
【대리인번호】	9-2015-002414-6
【발명의 국문명칭】	전력계통의 지진 피해 예측 방법 및 시스템
【발명의 영문명칭】	SEISMIC DAMAGE ESTIMATION METHOD AND SYSTEM FOR ELECTRIC POWER SYSTEM
【발명자】	
【성명】	박문서
【성명의 영문표기】	Park, Moonseo
【주민등록번호】	670210-1XXXXXX
【우편번호】	08826
【주소】	서울특별시 관악구 관악로 1 서울대학교 공과대학 39동 433호

70-1

【발명자】

【성명】 이슬비

【성명의 영문표기】 Lee, Seulbi

【주민등록번호】 890130-2XXXXXX

【우편번호】 08826

【주소】 서울특별시 관악구 관악로 1 서울대학교 공과대학 39동 425호

【출원언어】 국어

【심사청구】 청구

【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】

【과제고유번호】 1615009318

【부처명】 국토교통부

【연구관리 전문기관】 국토교통과학기술진흥원

【연구사업명】 국토교통기술촉진연구사업

【연구과제명】 네트워크 기반 라이프라인 지진 재해 기능저하 예측 모델

【기여율】 1/1

【주관기관】 서울대학교 산학협력단

【연구기간】 2017.04.10 ~ 2018.12.31

【취지】 위와 같이 특허청장에게 제출합니다.

대리인 이창재 (서명 또는 인)

대리인 서상덕 (서명 또는 인)

【수수료】

6-2) 특허 (등록)

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2018년12월17일
(11) 등록번호 10-1930174
(24) 등록일자 2018년12월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06Q 50/26 (2012.01) *G06F 17/10* (2006.01)
G06Q 50/06 (2012.01)
(52) CPC특허분류
G06Q 50/26 (2013.01)
G06F 17/10 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-0160443
(22) 출원일자 2017년11월28일
심사청구일자 2017년11월28일
(56) 선행기술조사문헌
보고서 1*
보고서 2*
JP20070155347 A*
JP2007155347 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
서울대학교산학협력단
서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)
(72) 발명자
박문서
서울특별시 관악구 관악로 1 서울대학교 공과대학 39동 433호
이슬비
서울특별시 관악구 관악로 1 서울대학교 공과대학 39동 425호
(74) 대리인
이창재, 서상덕

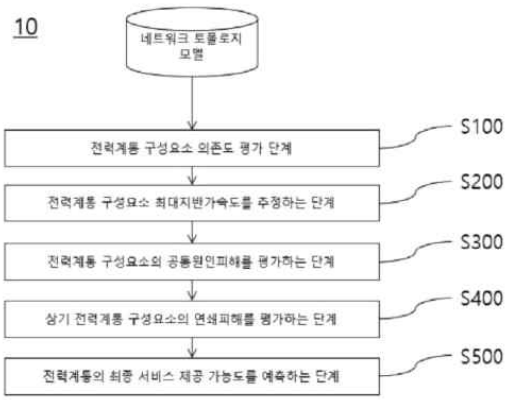
전체 청구항 수 : 총 18 항 심사관 : 김일환

(54) 발명의 명칭 **전력계통의 지진 피해 예측 방법 및 시스템**

(57) 요 약

본 발명은 입력된 지진 시나리오에 대한 전력계통의 피해를 예측하는 방법에 관한 것으로, 평가 대상 전력계통의 연결정보, 구성요소 위치정보, 구성요소 초기 서비스 공급정보를 포함하는 데이터베이스가 개별 셀의 집합으로 이루어진 네트워크 토폴로지 모델로부터 전력계통의 연결정보에 따라 전력계통 구성요소 의존도를 평가하는 단계, 사용자가 입력한 지진 시나리오와 상기 전력계통 구성요소의 위치정보에 따라 상기 전력계통 구성요소 최대지반가속도를 추정하는 단계, 상기 추정된 최대지반가속도에 따라 상기 전력계통 구성요소의 공통원인피해를 평가하는 단계, 상기 전력계통 구성요소의 의존도와 상기 공통원인피해 평가에 따라 상기 전력계통 구성요소의 연쇄피해를 평가하는 단계 및 상기 연쇄피해 평가와 상기 전력계통 구성요소의 초기 서비스 공급정보로부터 지진 이후 전력계통의 최종 서비스 제공 가능도를 예측하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도1



7) 소프트웨어 (등록)

제 C-2017-026647 호

저작권 등록증

1. 저작물의 제호(명칭)	라이프라인 네트워크 연쇄피해 예측 프로그램
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>과학기술>시뮬레이션 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	서울대학교 산학협력단 서울특별시 관악구 관악로
4. 생년월일(법인등록번호)	114371-0009224
5. 창작연월일	2017년09월18일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2017년11월02일
8. 등록사항	저작자 : 서울대학교 산학협력단, 창작 : 2017.09.18

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2017년 11월 06일

한국저작권위원회

KOREA COPYRIGHT COMMISSION · 한국저작권위원회 ·

8) 소프트웨어 (등록)

제 C-2018-024578 호

저작권 등록증

1. 저작물의 제호(명칭)	대구·경북지역 라이프라인 네트워크 지도
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>산업용 S/W>지리정보시스템(GIS) S/W
3. 저작자 성명(법인명)	서울대학교 산학협력단 서울특별시 관악구 관악로
4. 생년월일(법인등록번호)	114371-0009224
5. 창작연월일	2018년07월04일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2018년09월12일
8. 등록사항	저작자 : 서울대학교 산학협력단, 창작 : 2018.07.04

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2018년 09월 13일

한국저작권위원회

9) 소프트웨어 (등록)

제 C-2018-040042 호

저작권 등록증

1. 저작물의 제호(명칭)	라이프라인 피해파급 예측을 위한 베이지안 모형
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>과학기술>시뮬레이션 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	서울대학교 산학협력단 서울특별시 관악구 관악로
4. 생년월일(법인등록번호)	114371-0009224
5. 창작연월일	2018년11월15일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2018년12월27일
8. 등록사항	저작자 : 서울대학교 산학협력단, 창작 : 2018.11.15

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2019년 01월 03일

한국저작권위원회

KOREA COPYRIGHT COMMISSION · 한국저작권위원회

제11장. 기타 사항

- 해당 없음

제12장. 참고 문헌

[1] 강두선, 유도근, 김중훈 (2013). “상수관망 지진재해 대응력 향상을 위한 프로그램 개발.” 한국 수자원 학회지 물과 미래, 46(10), 43-39.

[2] 김민규, 전영선, 최인길, 오금호 (2009). “고장수목을 이용한 변전소의 지진취약도 분석.” 한국지진 공학회 논문집, 13(2), 47-58.

[3] 김유석, 이승원, 전새미 (2014). “건축물 지진 손실평가를 위한 전산프로그램.” 전산구조 공학회 논문집, 27(2), 35-40.

[4] 김진만, 오은호 (2014). “시설물 위험도 기반 재난관리시스템 구축 방안.” 대한토목학회 논문집, 62(6), 52-55.

[5] 박수열, 오은호, 최봉혁, 김진만 (2016). “SOC 시설물 재난대응 및 관리시스템 개발방향.” 한국 건설관리학회 논문집, 17(3), 134-142.

[6] 연관희, 박동희, 박세문 (2009). “국내 지진의 진도별 가속도 푸리에스펙트럼 통계모델.” 한국 지진공학회 논문집, 13(6), 11-25.

[7] 오상훈, 신승훈 (2013). “화산성지진의 거리감쇠식 도출에 관한 해석적 연구.” 대한건축학회 연합논문집, 15(6), 227-235.

[8] 이지원, 이준성 (2016). “SOC 노후화로 인한 도심형 재난 유형 분석 및 대비 방안에 관한 연구.” 한국건설관리학회 추계 학술발표대회논문집, 84-86

[9] 이철호 (2017). “912 경주지진 가속도기록의 지진공학적 분석.” 대한토목학회지, 65(4), 8-13.

[10] 전새미, 신동현, 김형준 (2014). “지진취약도를 통한 철골모멘트골조의 연간 손실 평가.” 전산 구조공학회 논문집, 27(6), 517-524.

[11] 조남대, 박창업 (2003). “한반도 남동부에서 부지효과를 고려한 스펙트럼 감쇠상수 x 추정 및 강지진동의 추계학적 모사.” 한국지진공학회 논문집, 7(6), 59-70.

[12] 한국과학기술기획평가원 (2014). ISSUE PAPER - 국민안전처 신설에 따른 재난안전 R&D 추진체계 개선방향.

[13] 한국원자력연구원(KAERI) (2008). 지진피해 취약도함수 국산화 연구 : 전력시설물의 지진취약도함수 국산화 연구.

[14] Adachi, T. and Ellingwood, B. R. (2008). “Serviceability of earthquake-damaged water systems: Effects of electrical power availability and power backup systems on system vulnerability.” Reliability Engineering and System Safety, 93(1), 78-88.

[15] Araneda, J. C., Rudnick, H., Mocarquer, S. and Miquel, P. (2010). “Lessons from the 2010 Chilean earthquake and its impact on electricity supply.” IEEE International Conference on Power System Technology, October, Hangzhou, Zhejiang, China.

[16] Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., and Nicol, D. M. (2005). Discrete-event System Simulation, 4th ed, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 367-398.

[17] Bensi, M. T., Der Kiureghian, A. and Straub, D. (2009). “A Bayesian network framework for post-earthquake infrastructure system performance assessment.” TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment, 1-12.

[18] Bobbio, A., Portinale, L., Minichino, M. and Ciancamerla, E. (2001). "Improving the analysis of dependable systems by mapping FTs into bayesian networks." Reliability Engineering and System Safety, 71, 249-260.

[19] Boore, D. M. and Atkinson, G. M. (2008). “Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s.” Earthquake Spectra, 24(1), 99-138.

[20] Bruneau, M. et al. (2003). "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities." Earthquake Spectra, 19(4), pp. 733-752.

[21] Campbell, K. W. (2003). “Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground-motion (attenuation) relations in eastern North America.” Bulletin of the Seismological Society of America, 93(3), 1012-1033.

[22] Cats, O., Koppenol, G. J., and Warnier, M. (2017). “Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks: Application for public transport systems.” Reliability Engineering and System Safety, 167, 544-553.

[23] Cheng, J., Greiner, R., Kelly, J., Bell, D. and Liu, W. (2002). “Learning Bayesian networks from data: an information-theory based approach. Artificial intelligence.” 137(1-2), 43-90.

[24] Dijkstra, E. W. (1959). "A note on two problems in connexion with graphs." Numerische Mathematik, 1(1), 269-271.

[25] Dueñas-Osorio, L., Craig, J. and Goodno, B. (2007). “Seismic response of critical interdependent networks.” Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36(2), 285-306.

[26] Dunn, S. and Wilkinson, S. (2013). "Identifying critical components in infrastructure networks using network topology." Journal of Infrastructure Systems, 19(2), 157-165.

[27] Federal Emergency Management Agency. (2003)"HAZUS-MH 2.1 earthquake model technical manual." <https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1820-25045-6286/hzmh2_1_eq_tm.pdf> (Last updated: Jan., 29, 2015)

[28] Goda, K., Kiyota, T., Pokhrel, R. M., Chiaro, G., Katagiri, T., Sharma, K. and Wilkinson, S. (2015). "The 2015 Gorkha Nepal earthquake: insights from earthquake damage survey." Frontiers in Built Environment, 1-8.

[29] Haimes, Y. and Jiang, P. (2001). "Leontief-based model of risk in complex interconnected infrastructures." Journal of Infrastructure System, 7(1), 1-12.

[30] Haimes, Y. Y. (2017) “Risk modeling of interdependent complex systems of systems: theory and practice.” Risk Analysis(Advance online publication) doi:10.1111/risa.12804.

[31] Hallegatte, S. (2008). “An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina.” Risk Analysis, 28(3), 779-799.

[32] Jo, N. and Bagg, C. (2003). “Estimation of spectrum decay parameter χ and stochastic prediction of strong ground motions in Southeastern Korea.” Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 7(6), 59-70.

[33] Johansson, J. and Hassel, H. (2010). “An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis.” Reliability Engineering and System Safety, 95(12), 1335-1344.

[34] Kawakami, H. (1990). "Earthquake physical damage and functional functionality of lifeline network models." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19(8), 1153-1165.

[35] Khakzad, N. "Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures." Reliability Engineering and System Safety, 138, 263-272.

[36] Kircher, C. A., Whitman, R. V. and Holmes., W. T. (2006). "HAZUS earthquake loss estimation methods." Natural Hazards Review, 7(2), 45-59.

[37] Korea Meteorological Adiministragion. (2016) “2016 Earthquake catalog.” <http://www.kma.go.kr/download_01/earthquake/earthquake_2016.pdf> (Last updated: Apr., 2017)

[38] Norris, F. H., Stevens, S. P., Pfefferbaum, B., Wyche, K. F., and Pfefferbaum, R. L. (2008). "Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness." American journal of community psychology, 41(1-2), 127-150.

[39] Oliva, G., Panzieri, S., and Setola, R. (2010). “Agent-based input-output interdependency model.” International Journal of Critical Infrastructure Protection, 3(2), 76-82.

[40] Orabi, W., Senouci, A. B., El-Rayes, K., and Al-Derham, H. (2010). “Optimizing resource utilization during the recovery of civil infrastructure systems.” Journal of Management in Engineering, 26(4), 237-246.

[41] O'Rourke, T. D. (2007). “Critical infrastructure, interdependencies, and resilience.” BRIDGE, Washington National Academy of Engineering, 37(1), 22-29.

[42] Ouyang, M. and Dueñas-Osorio, L. (2011) “Efficient approach to compute generalized interdependent effects between infrastructure systems.” Journal of Computing in Civil Engineering, 25(5), 394-406.

[43] Ouyang, M. (2014). "Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems." Reliability Engineering and System Safety, 121, 43-60.

[44] Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P. and Kelly, T. K. (2001). "Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies." IEEE Control Systems, 21(6), 11-25.

[45] Rose, A., Benavides, J., Chang, S. E., Szczesniak, P., and Lim, D. (1997). “The regional economic impact of an earthquake: direct and indirect effects of electricity lifeline disruptions.” Journal of Regional Science, 37(3), 437-458.

[46] Rose A and Liao S. (2005) “Modeling regional economic resilience to disasters: a computable general equilibrium analysis of water service disruptions.” Journal of Regional Science, 45(1), 75-112.

[47] Santos, J. R., Haimes, Y. Y., and Lian, C. (2007) “A framework for linking cybersecurity metrics to the modeling of macroeconomic interdependencies.” Risk Analysis, 27(5), 1283-1297.

[48] Shahjouei A. and Pezeshk S. (2016). “Alternative hybrid empirical ground motion model for central and eastern North America using hybrid simulations and NGA-West2 Models.” Bulletin of the Seismological Society of America, 106(2), 734-754.

[49] Tsuruta, M., Goto, Y., Shoji, Y. and Kataoka, S. (2008). “Damage propagation caused by interdependency among critical infrastructures.” In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), Beijing, China.

[50] Zio, E. and Piccinelli, R. (2010). “Randomized flow model and centrality measure for electrical power transmission network analysis.” Reliability Engineering and System Safety, 95(4), 379-385.

주의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발 성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.