

(옆면)

(앞면)

18CTAP
-C1298
09-02

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구 사업 제2차 연도 최종보고서

R&D /
18CTAP-C129809-02

한국형 파이프라인 내진 취약도 및 안전성 개선 최종보고서

한국형
파이프라인
내진 취약도
및 안전성
개선

2019. 01. 18.

최
종
보
고
서

주관연구기관 / 경희대학교 산학협력단
협동연구기관 / (주) 블루와이즈

2019

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'한국형 파이프라인 내진 취약도 및 안전성 평가'(연구개발 기간 : 2017.04.01. ~ 2018.12.31.)
과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 1. 18.

주관연구기관명 : 경희대학교 산학협력단 (대표자) 이 범 석



협동연구기관명 : ㈜ 블루와이즈

(대표자) 박 순 주



주관연구기관책임자: 주부석

협동연구기관책임자: 박순주

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129 809-02	해당 단계 연구 기간	2017.04.01.~ 2018.12.31.	단계구분	(2단계)/ (2단계)
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	한국형 파이프라인 내진 취약도 및 안전성 개선			
연구책임자	주부석	해당단계 참여연구원 수	총: 12명 내부: 12명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 220,000 천원 민간: 73,400 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 12명 내부: 12명 외부: 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 123,400 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속 부서명	경희대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	2	1	1			1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

- 각 구성요소의 상호연계성을 고려하여 파이프라인의 선형/비선형 유한요소 모델을 구축하였으며 T-Joint의 실험적연구 결과와 해석적 연구 결과를 비교하여 검증
- 진앙거리, 주기, 빈도 등의 지진파 불확실성을 고려한 지진 시나리오 구축
- 한국형 파이프라인의 MCS기반의 확률론적 안전성 평가인 지진 취약도 구축
- Bayesian Approach적용에 의한 파이프라인의 지진 취약도 구축
- 파이프라인의 보수/보강에 의한 내진거동 분석 및 취약요소 분석에 따른 보수/보강 기법과 사례분석

보고서 면수

61

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구의 목표는 파이프라인과 같은 비구조요소의 내진 안전성을 향상 시키고 내진 취약도 기반 확률론적 분석에 의한 파이프라인의 성능기반 내진 설계 가이드라인의 제시와 더불어 선진기술 수준의 보수/보강 기법 개발에 있다. ○ 한국형 파이프라인 내진해석기반 유한요소(Finite Element) 모델 구축 ◎ 상용프로그램(ABAQUS, ANSYS, OpenSees 등)을 활용한 파이프라인의 실험적 모델과 해석적 모델 검증 ◎ 파이프라인의 fluid-structure 상호작용기반 3D 유한 요소모델 개발 ◎ 파이프라인의 조인트, 엘보, 밸브 등 선형/비선형성에 의한 거동 분석을 위한 유한요소 모델 구축 ○ 한국형 파이프라인 내진 취약도를 위한 지진파 불확실성 분석 ◎ 한국형 파이프라인의 내진 취약도 분석을 위한 지진파의 불확실성분석 ◎ 지진파 분석에 따른 Spectrum 분석 및 파이프라인의 거동 이해와 평가를 위한 시간이력해석과 스펙트럼 해석 실시 ○ 한국형 파이프라인 내진해석기반 취약도 분석 및 안전성 개선을 위한 보수/보강 ◎ 파이프라인 재료 불확실성과 각 요소별 상호 연계성을 고려한 확률론적 내진 취약도 분석 모델 개발 ◎ 파이프라인 랜덤 불확실성 변수 기반 Bayesian Approach에 의한 내진 취약도의 신뢰도 개선 ◎ 파이프라인 내진 해석 및 각 요소별 내진거동 상호연계에 의한 선진수준의 보수/보강 기법 개발				
연구개발성과	○ 한국형 파이프라인의 내진거동 이해와 비선형 유한요소 모델 개발 ◎ 실험적/해석적 분석을 통한 파이프라인의 내진 거동 이해 ◎ 파이프라인의 내진 거동 기반 상용 소프트웨어를 사용한 해석적 모델 개발 ○ 한국형 파이프라인의 각 요소의 내진 거동에 근거한 내진 취약도 및 보수/보강 기법 개발 ◎ 파이프라인 각 요소 상호연계성을 고려한 내진 취약도 모델 제시 ◎ 내진취약도 분석을 위한 통계학적 접근으로 Bayesian Approach Model 제시 ◎ 내진 취약도 기반 응급복구를 위한 파이프라인 보수/보강 기법 개발				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 본 연구의 최종 결과물인 파이프라인의 각 요소의 내진 취약도 기반 주요 시설물의 파이프라인 거동 이해에 따른 주요시설물 파이프라인 안전성 향상 기대 ○ 파이프라인의 안전성 향상에 따른 지진 발생시 주요시설물의 운영능력 향상과 더불어 경제적/사회적 손실 최소화 ○ 파이프라인의 응급복구를 위한 보수/보강 기법 제시 또는 개발에 따른 선진기술 수준의 보수/보강 기법 개발 기대 ○ 한국형 파이프라인 각 요소별 상호연계성에 근거하여 파이프라인의 안전성 증대에 따른 신뢰도 높은 국가 방재 시스템 구축 기여 ○ 한국형 파이프라인 내진해석 기반 선진 기술 수준의 보수/보강 기법에 따른 원천기술 확보와 시장성 확보 증대				
핵심어 (5개 이내)	파이프라인	내진 취약도	확률론적 분석	응급복구	안전성평가

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	The primary objective of this study is to develop the advanced technology in terms of strengthening or retrofitting of piping system and construct the seismic fragility of Korean Standard piping system, during and after an earthquake. Further, the seismic design code of piping system as a nonstructural component will be provided. ○ Finite Element of Korean Standard piping system based on the performance based earthquake engineering ⊙ A reconciliation of experimental and analytical study with respect to piping system, using ABAQUS, ANSYS, OpenSees etc ⊙ Development of 3D Finite Element model associated with fluid-structure interaction ⊙ Construction of Finite Element Models for seismic performance of T-joint, Elbow, Valve based on linear and nonlinear behavior of piping system ○ Analysis of uncertainty of seismic ground motions for Korean Standard Piping System ⊙ Analysis of seismic ground motion uncertainties to perform the seismic fragility of piping system ⊙ Seismic performance of piping system, by using time history and spectrum analysis ○ Strengthening and retrofitting of Piping System and Fragility of Piping System ⊙ Seismic fragility of piping element systems related to interdependency of piping system and material uncertainties ⊙ Development of state-of-art seismic fragility evaluation of piping system, using Bayesian Approach ⊙ Improvement of advanced technology strengthening and retrofitting of piping system				
Results	○ FE model of Korea Standard Piping System ⊙ Understand the seismic behavior of piping system based on experimental tests and analytical study ⊙ Development of analytical model of piping system, regarding seismic performance of piping system ○ Seismic Fragility of Piping Element Systems and Emergency Strengthening and Retrofitting Technology ⊙ Seismic fragility of piping element systems in terms of the interdependency ⊙ Bayesian approach based on statistical methodology ⊙ Development of Emergency strengthening and retrofitting of piping system during and after an earthquake				
Expected Contribution	○ this study is to be contributed to the safety of piping system as a nonstructural component in a critical structure, considering the connect elements of piping system ○ Minimize the damage or loss of economics based on the improvement of seismic behavior of piping system and development of the advanced technology for emergency strengthening or retrofitting of the piping elements ○ Contribute the system of disaster mitigation related to the improvement of safety of piping system, regarding the interdependency of the connection element of piping system and improve of an economy invigorating of emergency recovery market, during and after strong earthquakes				
Keywords	Piping system	Seismic fragility	Probabilistic Risk Assessment	Emergency Recovery	Safety Evaluation

< CONTENTS >

Chapter 1. Overview of Research	1
1. Objective	1
1. Research Significance	2
1. Research Methodology	3
Chapter 2. Status of Technology Development in Domestic and Foreign	5
Chapter 3. Contents and Results of Research	6
1. Development of Finite Element Model for Pipelines	6
2. Seismic Hazard Analysis and Fragility Analysis	24
3. Assessment of Pipeline Seismic Behavior and Repair/Reinforcement Method for Safety Improvement	32
Chapter 4. Achievement of Objectives and Contribution on Related Field	47
1. Achievement of Goal	47
2. Contrivution of Related Field	49
3. Cause of Underdelivery and Future Measures	49
Chapter 5. Utilization Plan on Research Results	49
6Chapter . Science and Technology Information Gathered in Foreign During The Research	49
Chapter 7. Security Level of Research Achievement	49
Chapter 8. Research Facilities and Equipment Registered in national Science and Technology Information System	50
Chapter 9. Performance Results of Safety Action	50
Chapter 10. Representative Research Performance	51
Chapter 11. Other Conditions	51
Chapter 12. Reference	52

< 목 차 >

제 1장. 연구개발과제의 개요	1
1. 연구개발 목적	1
1. 연구개발 필요성	2
1. 연구개발 범위	3
제 2장. 국내외 기술 개발 현황	5
제 3장. 연구수행내용 및 성과	6
1. 한국형 파이프라인 내진해석 기반 유한요소모델 구축	6
2. 한국형 파이프라인 내진 취약도를 위한 지진파 불확실성 분석 및 내진 취약도 분석	24
3. 한국형 파이프라인 내진거동 평가 및 안전성 개선을 위한 보수/보강 기법	32
제 4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	46
1. 목표달성도	47
2. 관련분야 기여도	49
3. 목표 미달성시 원인 및 차후대책	49
제 5장. 연구개발성과의 활용 계획	49
제 6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	49
제 7장. 연구개발성과의 보안등급	49
제 8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	50
제 9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	50
제 10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	51
제 11장. 기타 사항	51
제 12장. 참고 문헌	52

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 기후변화로 인한 국가 주요 시설물 (병원, 학교, 복합시설물 등) 및 파이프라인과 같은 비구조요소의 재해/재난 노출 빈도 증대 및 피해증가

- 최근 10년간 자연재해 연평균 피해액은 약 1조 2700억 원 인명피해 129명으로 경제적 손실 및 인명 피해가 크게 발생 하고 있음.
- 지구온난화에 의한 이상기후 및 대기온도 상승과 함께 태풍빈도 증가 및 지각 변동으로 인한 전 세계적 강진 등 자연재해 발생 확률 증가.
- 2000년대 이후 한반도 지진 발생 횟수 약 2.5배 증가 및 지진규모 증가.
- 2016년 경주에서 지진이 발생하여 정부 추산 약 110여억원의 재산피해와 145여억원의 피해복구액이 발생하였으며 그 다음해 포항에서 지진이 발생하여 551억 원의 재산피해와 1445여억원의 복구액이 발생.
- 2016년에는 경주지진과 더불어 태풍 차바의 영향으로 남부지방의 시설물 피해 급증 - 태풍피해 1859억1400만원, 지진 피해 67억2300만원 총 약 1977억 8300만원의 피해가 발행하였음.
- 기존 구조물의 내진 안전성의 경우 파이프라인과 같은 비구조요소 보다 구조요소에 집중되어 상대적으로 비구조요소의 내진 안전성에 대하여 취약함을 보임.
- 주요시설물의 초기 건설투자비용의 경우 약 70% 이상이 파이프라인과 같은 비구조요소에 투자되고 있어, 이는 지진 발생시 비구조요소의 피해확률이 구조요소보다 상당히 큰 것으로 나타나고 있으며 비구조 요소의 지진피해 발생시 상당한 경제적 손실 및 복구비용 발생.
- 1994년 미국 Northridge Earthquake의 피해사례로, Olive View Hospital의 경우 병원 구조물의 구조적 손상은 없었으나 파이프라인의 손상으로 인해 환자 진료 및 치료시설 운영이 중단되는 사태가 발생.
- 1995년 일본 고베 지진의 경우 고베시의 약 40%이상의 파이프라인과 스프링클러 시스템의 손상으로 인해 지진 발생에 따른 초기 화재 진압 및 시설물 운영에 상당한 어려움을 겪음.
- 2016년 경주지진의 영향으로 인하여 구조요소 뿐만 아니라 파이프라인과 같은 비구조요소에 대한 내진 안전성에 대한 문제점과 비구조 요소 파괴로 인한 단수, 정보통신망 등의 기능이 마비될 경우 더 큰 피해를 가져 올 수 있다고 예상함.



Fig. 1.1.1 경주 및 포항지진 피해 비교

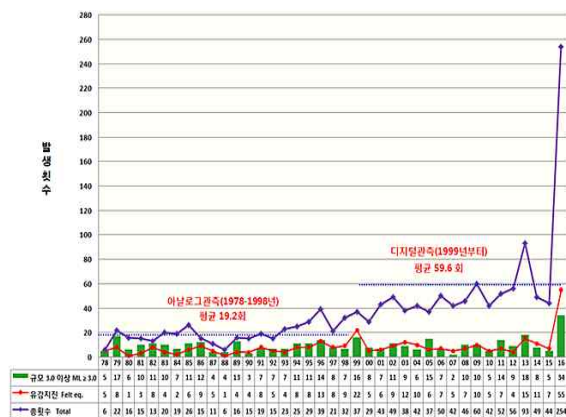


Fig. 1.1.2 국내 지진발생 추이



Fig. 1.1.3 경주지진 비구조요소 피해사례

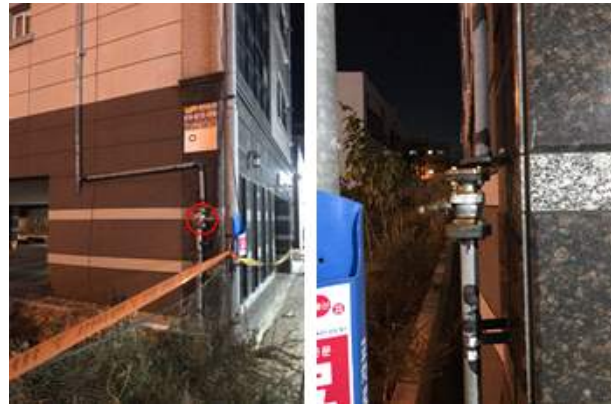


Fig. 1.1.4 포항지진 비구조요소 피해사례

나. 이에 따라서, 비구조요소에 속하는 파이프라인의 지진 취약성과 안전성 개선이 필요하며 또한 지진 발생 시 파이프라인의 가장 취약한 부분인 조인트 연결부의 응급복구를 위한 보수/보강 기술과 파이프라인 시스템에 관한 내진 설계기준이 필요하다고 판단된다.

다. 비구조요소의 내진성능을 강화함으로써 지진 발생 시 병원 및 복합시설물과 같은 주요 시설물의 경제적 손실/사회적 비용 절감 및 주요시설물의 운영향상을 위한 파이프라인의 내진안전성 구축 연구가 필요하다.

2. 연구개발의 필요성

가. 최근 기후변화에 따라 자연재해의 증가 및 불의 고리 활성화로 인한 지진 빈도 및 규모의 증가로 10년간 발생한 자연재해 피해 중 주요시설물의 피해액이 전체의 71% 비중을 차지하고 있다.

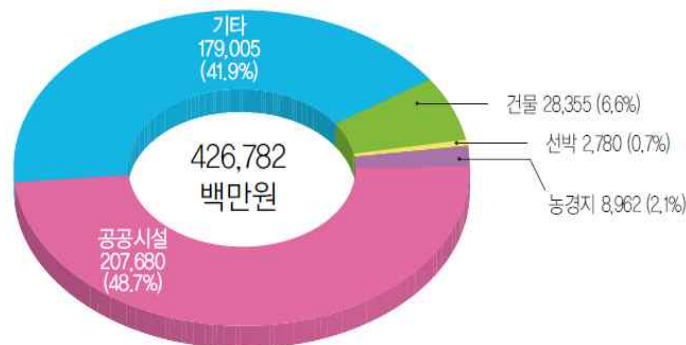


Fig. 1.2.1 시설물별 재산 피해 현황

나. 최근 발생한 지진에 따른 분석결과 주요시설물의 구조요소 보다 비구조요소의 지진 취약성이 심각한 것으로 나타나고 있으며, Fig. 1.2.2와 같이 주요 시설물의 건설 투자비용의 경우 약 70%이상의 비율이 비구조요소에 해당하고 있으며, 이는 지진발생시 비구조 요소에 상당한 피해를 초래 할 수 있어 비구조 요소의 내진 취약도 및 안전성 개선은 반드시 이루어져야 한다.

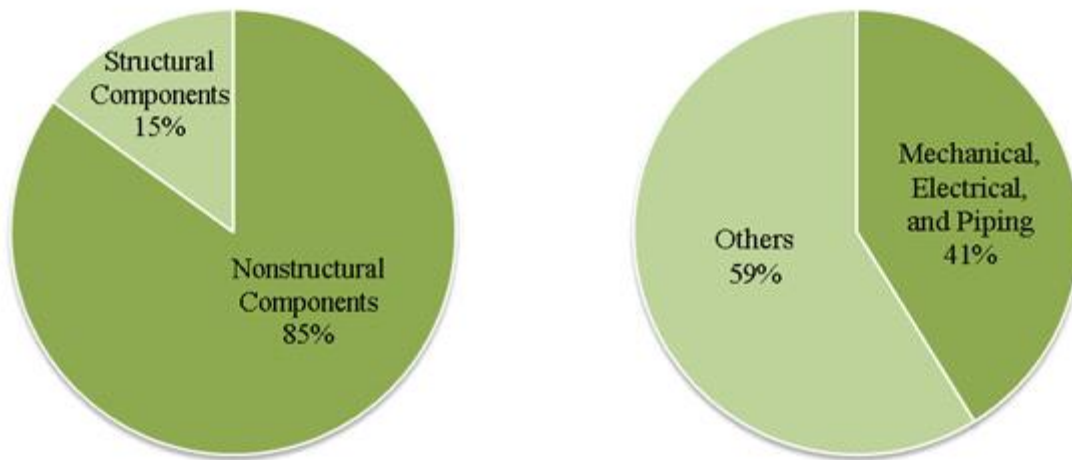


Fig. 1.2.2 비구조요소 건설비용 비율

다. 또한 지진 발생시 가스관 폭발 및 수도/스프링클러 라인 파괴로 인한 홍수 등의 2차 피해를 초래하는 복합재난이 발생할 확률이 높아, 지진 발생 시 화재 및 홍수와 같은 재해/재난에 대응하기 위해 파이프라인의 경우 성능 기반 내진 보강이 이루어져야 하며, 이를 바탕으로 지진의 불확실성에 따른 확률론적 분석이 반드시 이루어져 2차 피해 예방에 노력하여야 한다.

라. 지진 발생시 주요시설물의 운영능력 향상과 인명피해 최소화를 위하여 노후화된 주요시설물의 노후화된 파이프라인의 내진 보강에 따른 성능 향상을 기반으로 내진해석에 따른 선진기술 수준의 보수/보강 기법 구축과 그에 따른 주요시설물의 파이프라인의 안전성 검증과 평가가 이루어져야 한다.

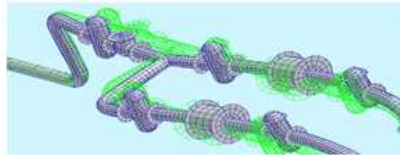
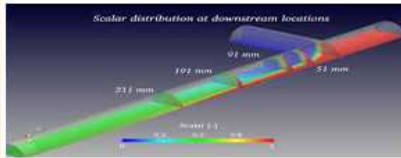
마. 파이프라인의 내진 성능 향상 기반 주요 시설물의 안전성 증대 및 경제적 사회적 손실 최소화 와 인명피해 최소화 및 선진적인 국가 방재 통합 시스템 구축과 피해 발생 시 복구시간 단축 및 복구 비용 절감이 필요하며 이에 따라 파이프라인 시스템의 지진대응 연구시스템의 새로운 틀을 마련해야 한다.

3. 연구개발 범위

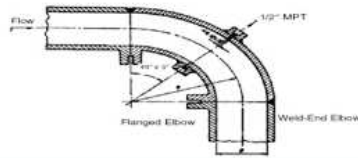
가. 1차년도 연구개발 범위 및 목표

구분	연구 목표	연구기관
1.한국형 파이프라인 내진해석 기반 유한요소 모델 구축	✓ 파이프라인 거동 분석을 위한 선행 연구 및 데이터 분석	주관 연구기관 경희대
	✓ 파이프라인 실험적 평가 기반 비선형 유한요소 모델 구축	
	✓ 파이프라인 fluid-structure 상호작용기반 3D 유한요소 모델 개발	
	✓ 파이프라인 해석적 연구를 위한 파이프라인 취약부 (조인트, 엘보, 밸브 등) 실험적 연구	공동 연구기관 (주)인시티
	✓ 실험적 평가 기반 파이프라인 해석적 모델 검증을 위한 파이프라인 유한요소 모델 구축 및 재료 불확실성을 위한 랜덤변수 분석	
	✓ 파이프라인의 실험적 연구기반 거동 예측을 위한 통계적 분석	

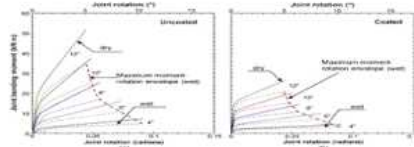
주관연구기관 — 경희대학교



Nonlinear FE Model and Fluid-Structure Interaction Model



Experimental Test and Statistical Approach



공동연구기관 — (주) 인시티

Fig. 1.3.1 1차년도 연구개발 범위

나. 2차년도 연구개발 범위 및 목표

구분	연구 목표	연구기관
1. 한국형 파이프라인 내진 취약도를 위한 지진파 불확실성 분석 2. 한국형 파이프라인내진해석 기반 취약도 분석 및 안전성 개선을 위한 보수/보강	✓ 한국형 파이프라인의 내진 취약도 분석을 위한 지진파의 불확실성 분석	주관 연구기관 경희대
	✓ 파이프라인 재료 불확실성과 각 요소별 상호 연계성을 고려한 확률론적 내진 취약도 분석 모델 개발	
	✓ 파이프라인 랜덤 불확실성 변수 기반 Bayesian Approach에 의한 내진 취약도의 신뢰도 개선	
	✓ 지진파 분석에 따른 Spectrum 분석 및 파이프라인의 거동 이해와 평가를 위한 시간이력해석과 스펙트럼 해석 실시	공동 연구기관 (주)블루와이즈
	✓ 파이프라인 내진 해석 및 각 요소별 내진거동 상호연계에 의한 선진수준의 보수/보강 기법 및 통계학적 데이터 분석	
	✓ 파이프라인 랜덤 불확실성 변수 기반 Bayesian Approach에 의한 내진 취약도의 신뢰도 개선을 위한 랜덤변수 분석	

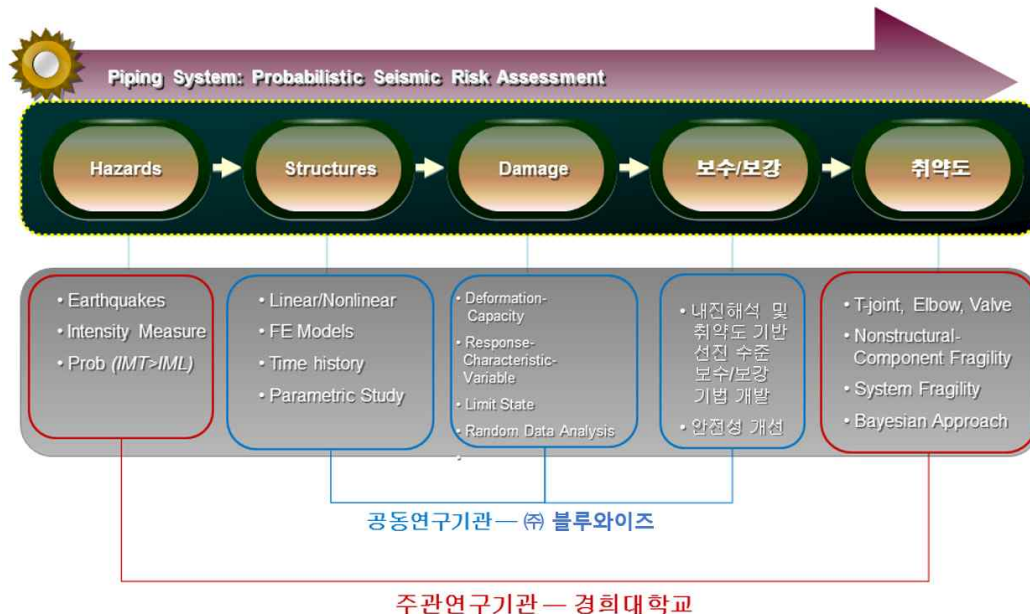


Fig. 1.3.2 2차년도 연구개발 범위

제2장. 국내외 기술 개발 현황

가. 국내 개발 현황

- 건축법 제 48조의 2: “국토교통부장관은 지진으로부터 건축물의 구조 안전을 확보하기 위하여 건축물의 용도, 규모 및 설계구조의 중요도에 따라 내진등급을 설정하여야 한다.” 규정에 의거 건축구조기준 (KBC 2016) 내진설계 기준 및 성능 등급 요약 개선
- 국내 파이프라인 연구현황의 경우 주로 원자력 발전소의 내진 분석에 기초한 원자력 발전소 파이프라인의 안전성 평가와 더불어 내진취약도 분석 연구 실시
- 2012년 수계파이프 시스템의 등가정적해석법을 적용한 내진설계 안전성 평가 연구가 되었지만, 이는 파이프라인의 기초적인 동적거동을 이해하는 수준으로 파이프라인의 복잡성을 적용한 내진 안전성 평가 연구 및 확률론적 접근법 분석이 미흡.

나. 국외 개발 현황

- 미국: 1971 San Fernando Earthquake 이후 비구조요소에 대한 내진 성능 개선 및 설계기준 제도와 정책 수립 현재 CBC, IBC, UBC 등 여러 설계기준코드에 비구조요소 내진 설계기준 적용.
- 일본: 1995년 고베 지진 이후 스프링클러와 같은 주요구조물의 파이프라인 시스템에 대하여 내진 성능 보강 및 설계기준 마련.
- 유럽: Euro-Code를 바탕으로 하여 지역별 비구조 요소 설계가이드라인 마련.
- 미국의 경우 원자력발전소 파이프라인의 경우 ASCE와 ASME등의 여러 규정에 의하여 내진설계가 적용되고 있으면, 또한 주요 시설물의 파이프라인의 경우 NFPA-13이나 SMACNA와 같은 가이드라인에 따라서 설계기준이 정립.
- 또한 1994년 Northridge Earthquake 이후 파이프라인의 안전성 문제를 개선 하고자 NSF 및 NEES에서 파이프라인과 비구조요소의 연구를 진행하고 있으며, 실험적 연구와 해석적 연구를 병행 하고 이를 바탕으로 설계기준을 개선.
- 지진 활성대에 위치한 일본의 경우 일본 국립방재청 주관으로 large scale piping system의 실험적 연구가 진행되고 있으며 정적/동적 테스트를 통한 거동분석과 선형/비선형 유한요소모델을 구축하여 해석연구와 실험연구를 비교 분석.

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 한국형 파이프라인 내진해석 기반 유한요소 모델 구축

가. 파이프라인의 내진성능평가 실험 선행연구 및 데이터 분석

1) 압착식 조인트가 적용된 파이프라인의 내진성능평가 관련 실험적 연구 분석

- 압착식 조인트가 적용된 수계소화설비 파이프라인의 내진성능평가를 위해 Cyclic Loading을 적용하여 실험을 진행.
- 건축구조기준에서 빌딩 구조물의 층간변위가 2%를 넘어서면 빌딩 시스템의 손상이 발생할 것으로 판단하고 있음.
- 빌딩 시스템의 손상으로 인해 구조물의 층간 변위가 증가함에 따라 수직 파이프라인 및 조인트에서 손상이 발생할 수 있음.
- 위 사항에 근거하여 건축구조 기준의 최대 층간변위에 따라 최대 층간변위 $0.02h (\pm 60mm)$ 의 변위를 10회 반복하여 적용.
- 실제 사용 중인 파이프라인과 동일한 조건을 부여하기 위해 펌프를 이용하여 2MPa의 내압을 적용.

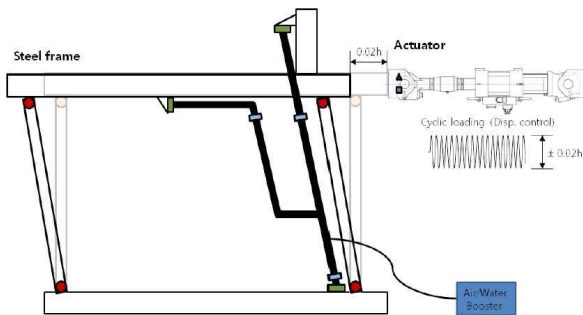


Fig. 3.1.1 내진성능 평가 실험 모식도

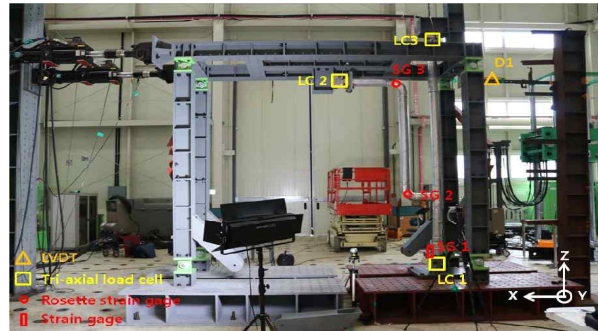


Fig. 3.1.2 계측기 위치

- 실험결과 최대 반력은 중단 고정부의 Z축 반력이 7.858kN으로 가장 크게 발생.
- X축의 최대 반력은 상단 고정부에서 5.605kN으로 나타났으며 Y축 최대 반력은 중단 고정부에서 0.528kN으로 발생.
- 아래 Table 3.1.1에는 Elbow 및 Straight Joint에서 발생한 최대 및 최소 변형률을 정리하였으며 Table 3.1.2는 각 고정부에서 발생한 축 방향 별 최대, 최소 반력을, Table 3.1.3은 Elbow Joint에서 발생한 최대 Von-Mises를 정리하여 나타냄.

Table 3.1.1 계측기 위치 및 정보

계측기	계측기 번호	Orientation	변형률($\mu m/m$)	
			Max	Min
SG1	S1	Z(Axial)	545.5	-216.0
SG2	S2	R(Axial)	479.6	-618.0
	S3	G(45°)	749.8	-782.0
	S4	W(Hoop)	946.0	-832.2
SG3	S5	R(Axial)	1437.0	-1272.0
	S6	G(45°)	1107.0	-1171.0
	S7	W(Hoop)	527.0	-960.2

Table 3.1.2 고정부에서 발생한 축방향 별 최대 및 최소 반력

계측기	계측기 번호	Orientation	Force(kN)	
			Max	Min
LC1	L1	X	5.605	-5.407
	L2	Y	0.132	-0.066
	L3	Z	3.195	-2.186
LC2	L4	X	1.181	-2.868
	L5	Y	0.330	-0.528
	L6	Z	7.858	-6.632
LC3	L7	X	2.536	-2.372
	L8	Y	0.157	-0.157
	L9	Z	4.852	-3.681

Table 3.1.3 Elbow Joint에서 발생한 최대 Von-Mises 응력

계측기	계측기 위치	Max. Von-Mises Stress (MPa)
SG2	Elbow 1	205.3
SG3	Elbow 2	406.7

나. Elbow, Tee, Straight Joint와 파이프간의 접촉에 의한 거동 분석을 위한 유한요소 모델 구축

1) 파이프라인 시스템의 내진성능평가 실험에서 사용된 파이프의 제원에 따라 유한요소 모델 구축

○ 내진성능평가 실험을 진행한 시험체의 재료는 Stainless Steel로써 외경은 114.3mm, 내경은 112.3mm.

○ 재료 및 단면의 특성은 Table 3.1.4와 같으며 ABAQUSPlatform에서 제공하는 3D Shell 요소 (S4R)요소를 사용하여 유한요소 모델 구축.

○ Fig. 3.1.3은 파이프라인 각 구성요소의 구축된 유한요소 모델.

Table 3.1.4 단면 및 재료 특성

외경(mm)	밀도(N/mm3)	탄성계수(MPa)	Poisson's Ratio
114.3	7.85e-9	200,000	0.3

Table 3.1.5 유한요소 구축에 사용된 요소 및 노드 특성

Properties Pipeline Name	Element Type	Number of Elements	Number of Nodes
T-Joint	3D Shell (S4R)	23071	23206
Elbow-Joint		19738	19880
Straight-Joint		2840	2911
Straight-Pipeline1		87188	87330
Straight-Pipeline2		19738	19809
Straight-Pipeline3		7952	8023
Straight-Pipeline3		2840	2911

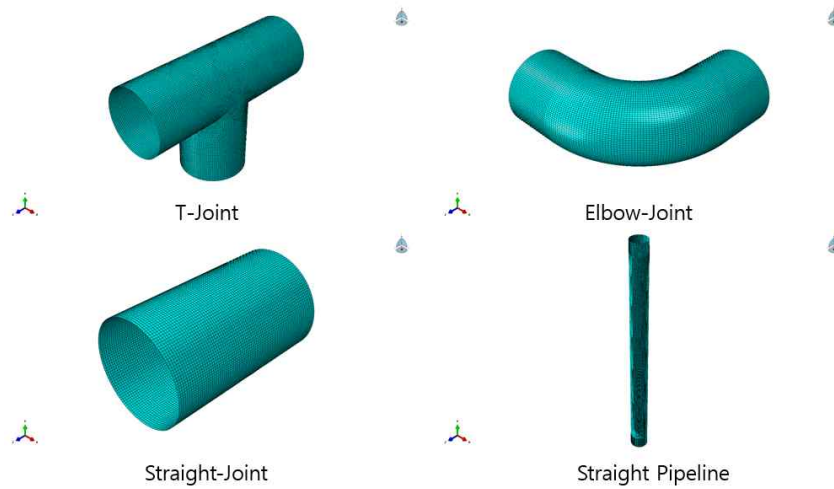


Fig. 3.1.3 파이프라인의 각 구성요소의 유한요소 모델

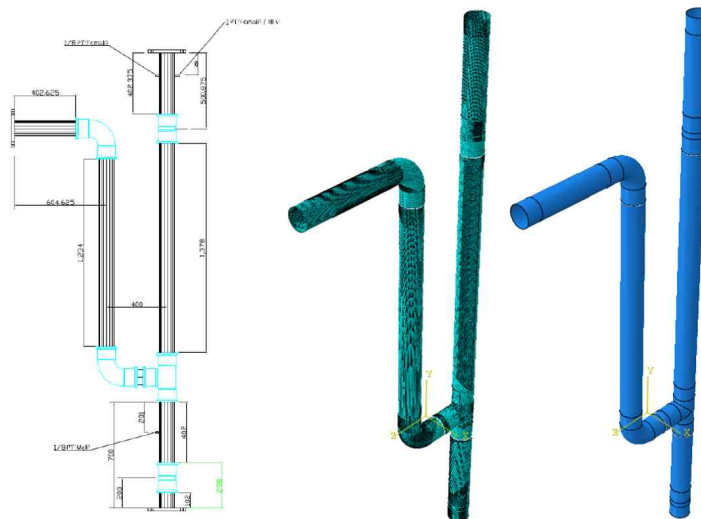


Fig. 3.1.4 파이프라인의 도면 및 유한요소 모델

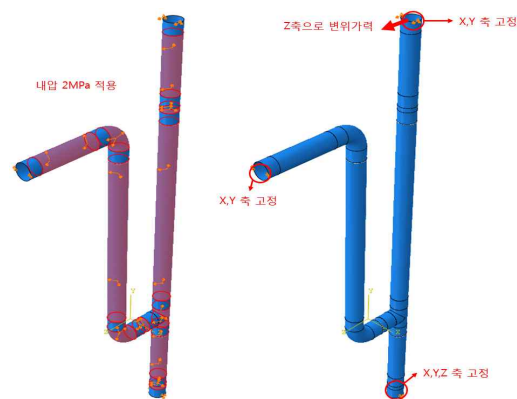


Fig. 3.1.5 하중 및 경계조건

2) 접촉에 의해 파이프라인 전체 시스템의 거동 변화를 비교하기 위해 각 Joint의 연결부에 Tie 조건을 적용하여 선형해석 수행

- 내진성능평가 실험과 동일한 조건인 2 MPa의 내압을 적용하여 선형 해석 수행
- 경계조건은 아래 그림과 같이 적용하였으며 각 파이프라인의 연결부가 일체 거동하는 조건을 부여하기 위해 ABAQUS Platform의 Tie 옵션을 적용
- 적용된 Cyclic Loading은 실험과 동일하게 분당 20mm의 변위를 적용하여 최대 $\pm 60\text{mm}$ 까지 1회 반복하는 것으로 적용

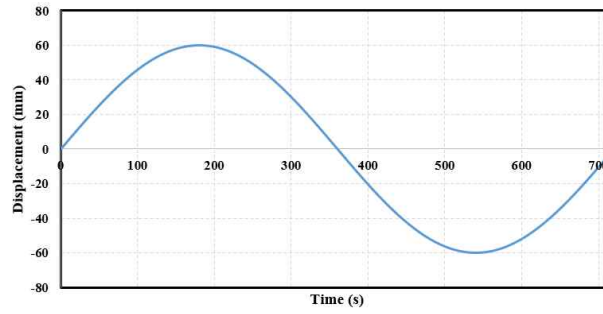


Fig. 3.1.6 하중 Protocol

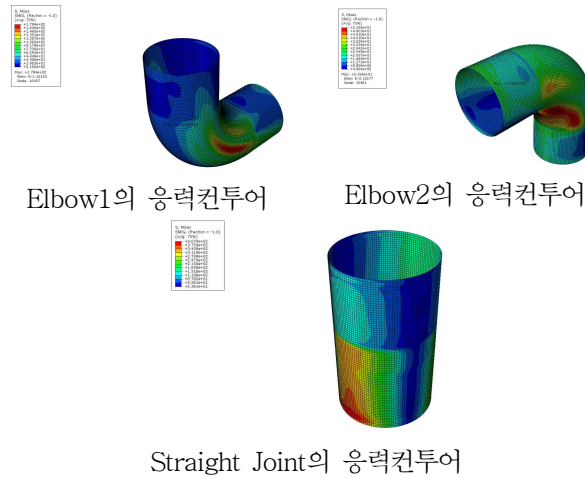


Fig. 3.1.7 각 Joint의 응력컨투어

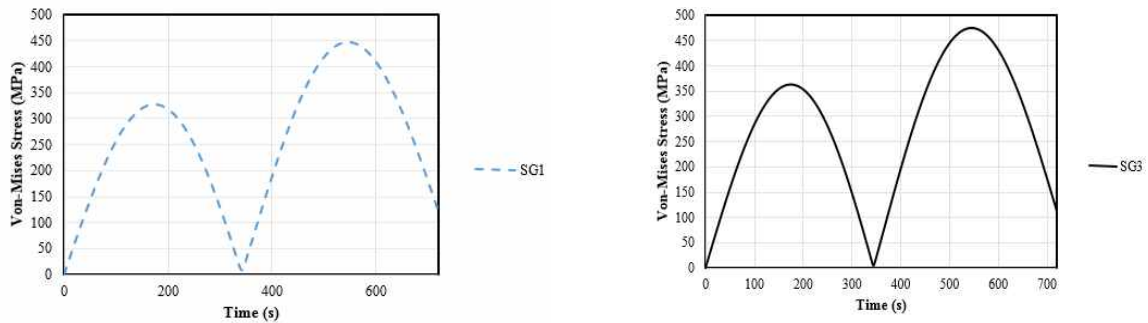


Fig. 3.1.8 Elbow Joint의 응력시간이력 데이터

3) 각 Joint 연결부에 Contact Element를 적용하여 접촉을 고려한 비선형 해석 수행

- ABAQUS Platform에서는 다양한 접촉 이산화 모델을 제공하고 있으며 본 연구에서는 Surface-to-Surface 접촉 이산화를 적용하여 비선형 해석을 수행.
- 또한 Contact 요소를 적용함에 있어 여러 가지 제약조건들이 적용되는데 본 연구에서는 수렴성을 크게 증가시키는 Penalty 강성을 이용한 Penalty 제약조건을 적용.
- 적용된 하중의 경우 Tie 모델과 동일하며 아래 그림에서와 같이 Joint와 Straight Pipe간의 접촉이 발생하는 곳에 Contact요소를 적용.

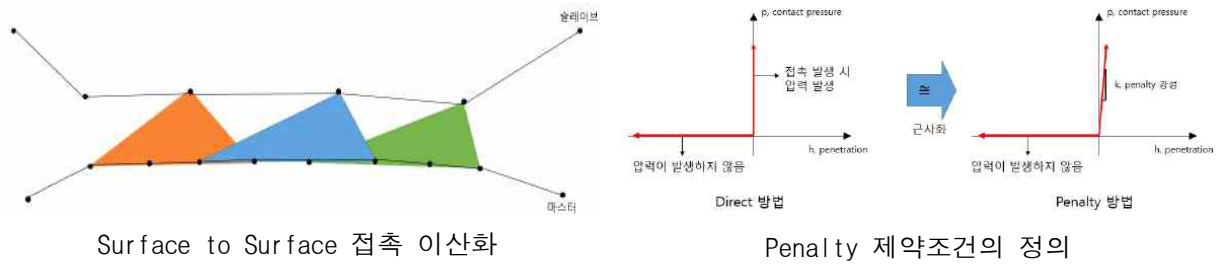


Fig. 3.1.9 ABAQUS Platform의 Contact 조건

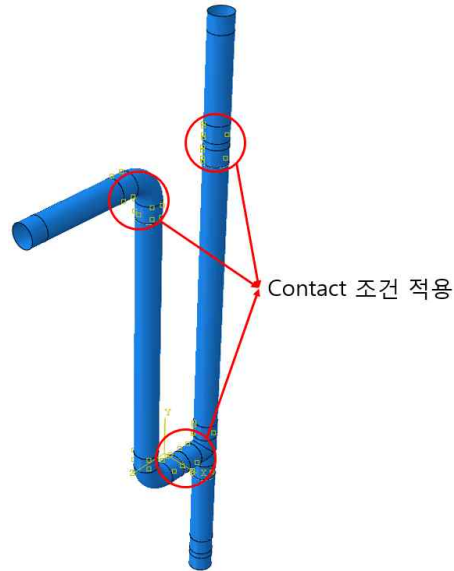
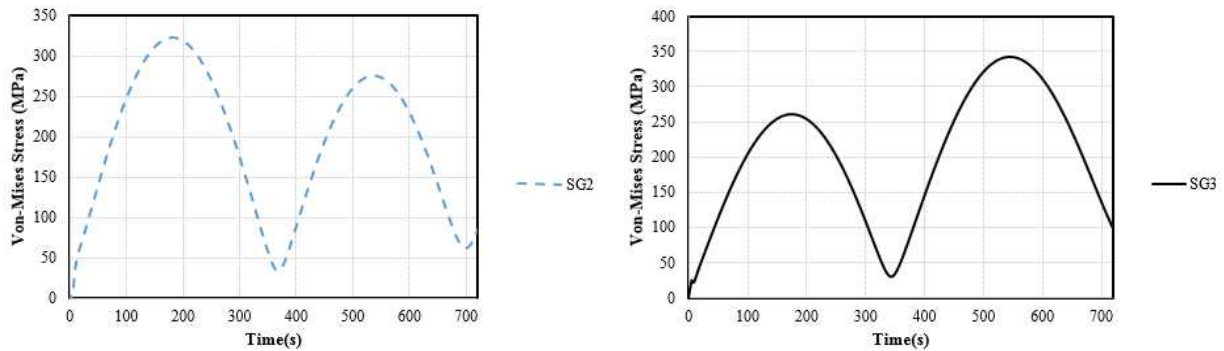


Fig. 3.1.10 Contact 요소 적용



SG2위치에서의 응력시간이력 데이터

<SG3위치에서의 응력시간이력 데이터>

Fig. 3.1.11 Elbow Joint의 응력시간이력 데이터

4) OpenSees Platform의 비선형 모델을 사용하여 T-Joint의 유한요소 모델 구축

○ 실험적 데이터 기반 비선형 유한요소 모델 검증.

○ Coupling Type 별 비선형 거동 분석.

○ Schedule Type 별 비선형 유한요소 모델 검증.

○ Threaded와 Grooved Coupling 변화에 따른 T-조인트의 강성 변화 분석.



Threaded T-joint Connection



Grooved T-joint Connection

(Yuan Tian, 2010, NEESR Nonstructural Progress Report)

Fig. 3.1.12 T-Joint의 반복하중 실험

- Pipe Size : 1-inch, 2-inch, 4-inch
- Coupling Type : Threaded & Grooved
- Schedule : Schedule 10&40

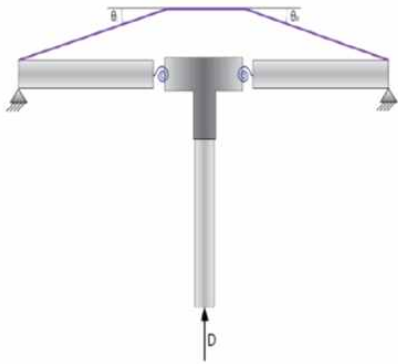


Fig. 3.1.13 T-Joint Nonlinear FE Model

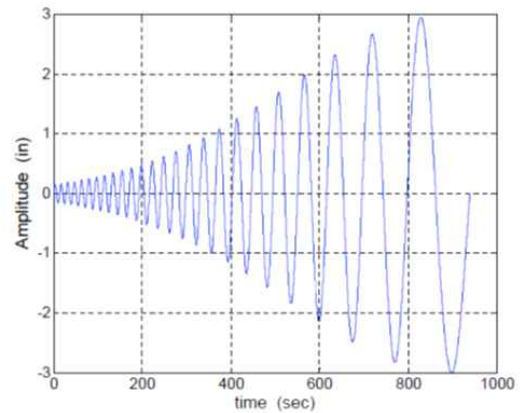
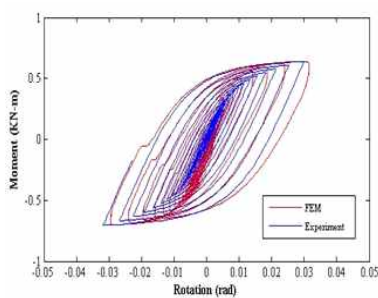
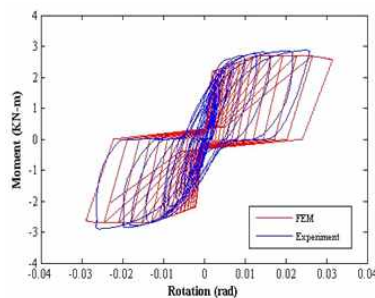


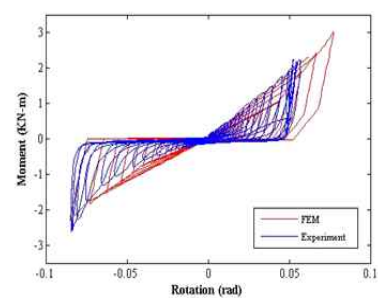
Fig. 3.1.14 Testing Protocol(Quasi-Static for Cyclic Tests)



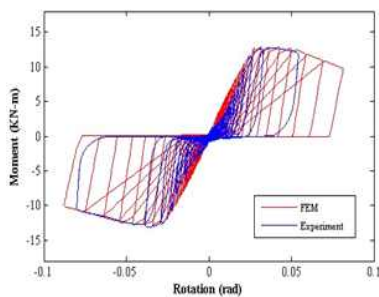
(a) 1-inch Schedule 40
Threaded



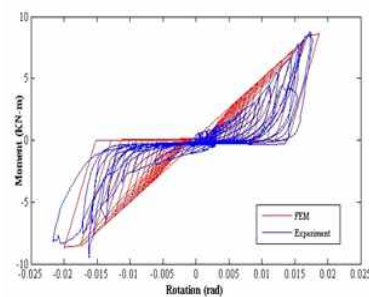
(b) 2-inch Schedule 40
Threaded



(c) 2-inch Schedule 40
Grooved



(d) 4-inch Schedule 10 Grooved



(e) 4-inch Schedule 40 Grooved

Fig. 3.1.15 실험 및 유한요소 해석결과 비교

다. 파이프라인의 Fluid-Structure Interaction(FSI) 기반 3D 유한요소 모델 구축

1) 본 연구에서는 유체의 거동에 의한 파이프라인의 거동 변화를 관측하기 위해 Fluid-Structure Interaction을 고려한 3D 유한요소 모델을 구축함

○ ABAQUS Platform에서 제공되는 CFD 모듈을 이용하여 FSI를 적용

○ Unsteady 상태에서의 유체의 지배방정식은 다음 수식 3.1.1 과 같이 표현됨

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho v dV + \int_S \rho v \otimes (v - v_m) n dS = - \int_V \nabla p dV + \int_S \tau n dS + \int_V f dV \quad (3.1.1)$$

○ Steady 상태에서의 유체의 지배방정식은 다음 수식 3.1.2와 같이 표현됨

$$\int_S \rho v \otimes v n dS = - \int_V \nabla p dV + \int_S \tau n dS + \int_V f dV \quad (3.1.2)$$

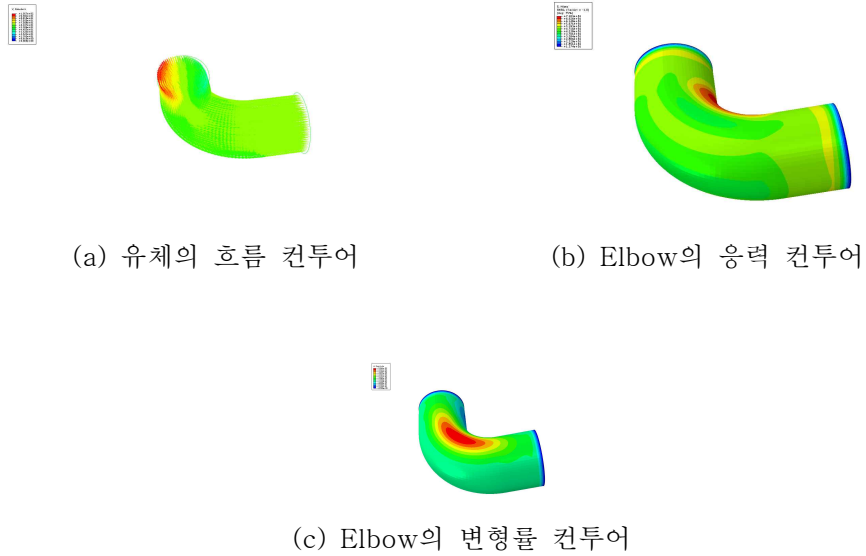


Fig. 3.1.16 FSI 해석 결과

라. 각 요소에 따른 파이프라인 거동 예측 실험 계획 수립

1) 유사 정적 실험 계획 수립

a) 가력장치 및 경계조건 결정

○ 본 실험에선 우선적으로 내부 유압이 없는 파이프라인의 거동에 대한 실험을 수행, 이를 기반으로 하여 실험 결과와 일치하는 수치해석 모델을 생성.

○ 추후 수치적으로 유압을 고려한 파이프라인 건결부의 거동을 해석적으로 검토하는 것으로 제안.

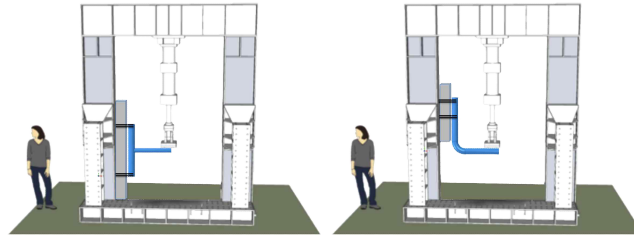


Fig. 3.1.17 파이프라인 연결부 반복 하중 실험 셋업(좌 T형, 우 L형)

- 시험체에 대한 가력장치는 500kN 액츄에이트를 사용하고 구조 실험용 프레임을 제작하여 설치.
- 가력장치의 최대 변위는 300mm이며 반복 하중을 재하할 경우 $\pm 150\text{mm}$ 까지 재하 가능하므로 이를 고려하여 시험체의 크기를 결정.
- 시험체를 고정하기 위하여 대형 클램프를 사용. T형 연결부의 경우 상하 단을 구조용 프레임과 클램프로 고정.
- 특히, 연결부에서 회전 변형이 발생할 경우 구조용 프레임과 접촉이 발생하지 않고 자유로이 회전 변형이 발생할 수 있도록 시험체를 구조용 프레임에서 다소 분리하여 유격을 갖도록 고정하며, 유격 정도는 유한 요소 해석결과를 바탕으로 결정.

b) 실험계획

- 시험체의 거동을 평가하기 위하여 설치하는 측정센서의 위치는 유한요소해석 결과를 바탕으로 구성.

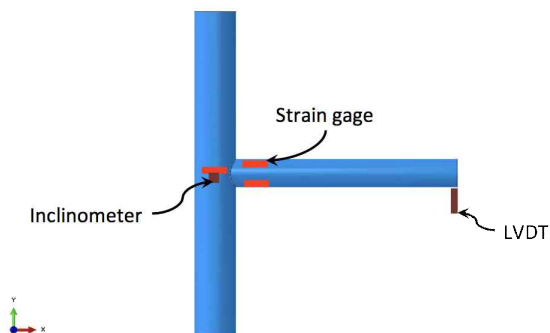


Fig. 3.1.18 T형 연결부 측정 센서 위치>

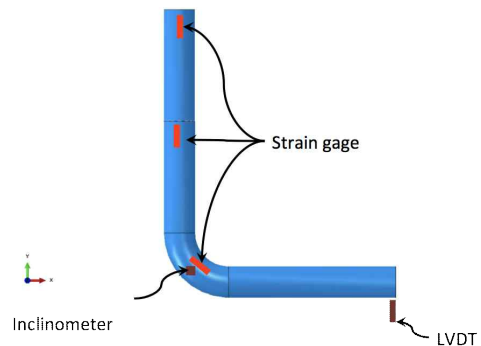


Fig. 3.1.19 L형 연결부 측정 센서 위치

- 측정 센서로는 파이프라인의 변형률을 측정하기 위한 strain gage, 가력 부분의 변위를 측정하기 위한 LVDT, 그리고 연결부의 회전량을 측정하기 위한 inclinometer를 설치.
- 실험은 각 파이프라인 형태 별로 반복하중을 재하하여 지진 시에 발생하는 동적 효과를 Quasi-static 형태로 시험을 수행.
- 초기 반복은 탄성범위 내에서 가력하고 이를 점차 확대하여 부재의 소성 영역을 거쳐 파괴에 이르도록 하중 프로토콜을 구성.
- 이때 하중은 힘의 형태가 아닌 변위 제어로 재하.

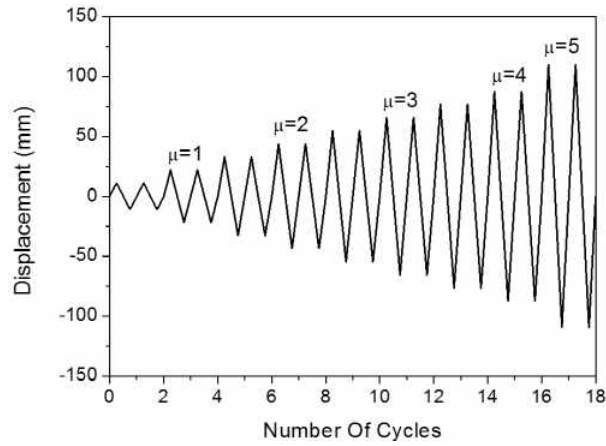


Fig. 3.1.20 유사 정적 실험의 변위 하중 프로토콜 예>

마. 해석적 유한요소 모델 구축 및 파이프라인 유한요소 모델 해석결과

1) 파이프라인 연결부의 형상 및 제원

a) T형 연결부

- 수직 메인파이프 제원 설정 : 외경 280mm, 내경 128mm 두께 24mm.
- 분기 파이프라인 제원 설정 : 외경 200mm, 내경 175.5mm 두께 24.5mm.
- 사용된 강재는 KS D 3507 SPP 배관용 탄소강 강관을 적용 탄성계수는 170GPa, 포아송 값은 0.3, 항복응력은 294MPa으로 결정.

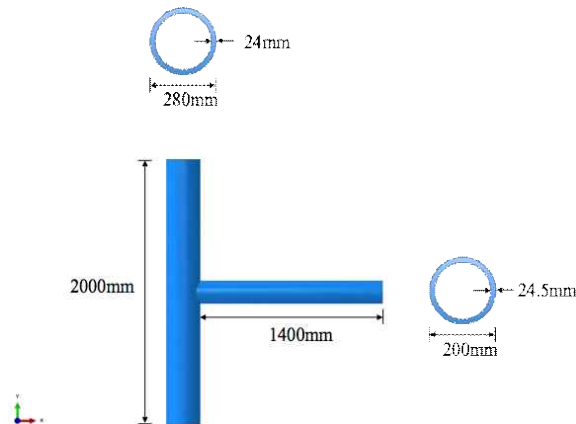


Fig. 3.1.21 파이프라인 T형 연결부 형상>

b) L형 연결부

- 수직 메인파이프 제원 설정 : 외경 280mm, 내경 128mm 두께 24mm.
- 분기 파이프라인 제원 설정 : 외경 200mm, 내경 175.5mm 두께 24.5mm.
- 사용된 강재는 KS D 3507 SPP 배관용 탄소강 강관을 적용 탄성계수는 170GPa, 포아송 값은 0.3, 항복응력은 294MPa으로 결정.

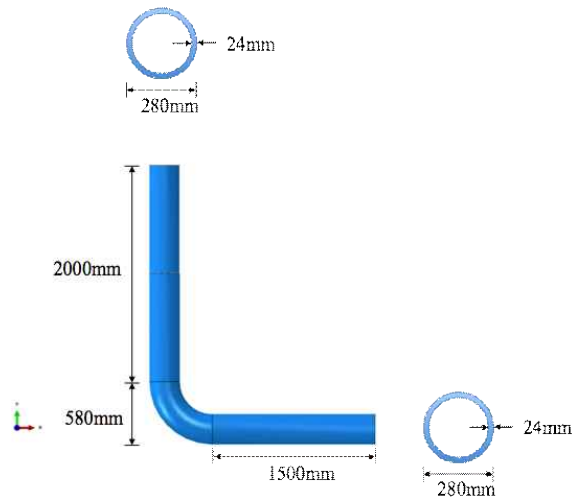
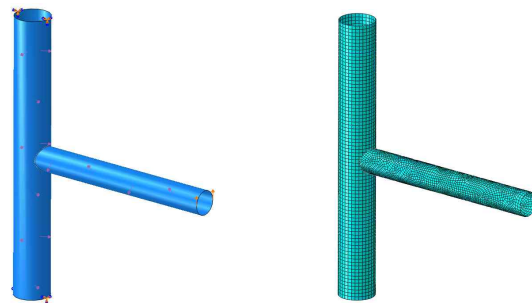


Fig. 3.1.22 파이프라인 L형 연결부 형상

2) 유한요소 모델

a) T형 연결부

- 수직 파이프라인 부재의 상하단 끝단을 고정단으로 설정.
- 우측 끝단은 수직 변위에 대하여 구속하여 하중을 변위 형태로 가력할 수 있도록 설정.



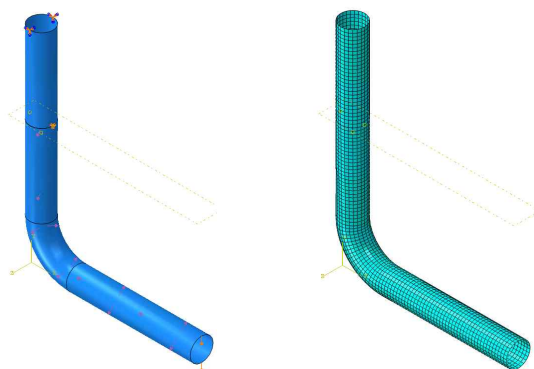
T형 연결부의 경계 조건

T 형 연결부의 메쉬 형상

Fig. 3.1.23 T형 연결부의 유한요소 모델

b) L형 연결부

- 수직 파이프라인 부재의 상단 끝단을 고정단으로 설정.
- 1000mm 아래 부분에는 변위 자유도만 구속.
- 우측 끝단은 수직 변위에 대하여 구속하여 하중을 변위 형태로 가력할 수 있도록 설정.



L형 연결부의 경계 조건

L 형 연결부의 메쉬 형상

Fig. 3.1.24 L형 연결부의 유한요소 모델

3) 하중조건

- 하중 조건은 파이프라인 우측 끝단에서 변위하중을 상하로 작용하여 von Mises 응력을 이용한 소성 여부를 검토.
- T 형 연결부의 경우 상하 대칭 형상이므로 변위 하중의 방향 상관없이 동일한 해석 결과가 도출 될 것으로 예측.
- 따라서 한쪽 방향으로만 하중을 재하.
- L 형 연결부의 경우 기하학적으로 비대칭 형상이므로 윗방향으로 작용할 때와 아랫방향으로 하중이 작용할 때에 따라 거동의 특성이 달라질 것으로 예측되어 각각에 대하여 검토.
- 또한 내부 유체의 압력 레벨에 따른 파이프라인 전체 안전성도 변할 것으로 예측되어 이를 고려한 해석을 수행.

Table. 3.1.6 해석조건

연결부 형태	내부 압력	최대 변위하중
T 형 연결부	no pressure	-15mm
	12 MPa	-15mm
	24 MPa	-15mm
	36 MPa	-15mm
	48 MPa	-15mm
	60 MPa	-15mm
	72 MPa	-15mm
L 형 연결부 (하향 방향)	no pressure	-40mm
	3 MPa	-40mm
	6 MPa	-40mm
	12 MPa	-15mm
	24 MPa	-15mm
L 형 연결부 (상향 방향)	no pressure	30mm
	3 MPa	30mm
	6 MPa	30mm
	12 MPa	15mm
	24 MPa	15mm

4) 해석 결과

a) T 형 연결부 해석 결과

- 내부 압력이 없는 경우 수직 변위 하중 15mm에서 연결부의 수직 부재에서 항복 발생.
- 내부 압력이 12 MPa 인 경우 수직 변위 하중이 15mm에서 연결부의 수직 부재에서 항복 발생. 전체적으로 내부 압력이 없는 경우 보다 항복이 발생한 영역이 크고, 부재에서의 응력도 크게 발생.

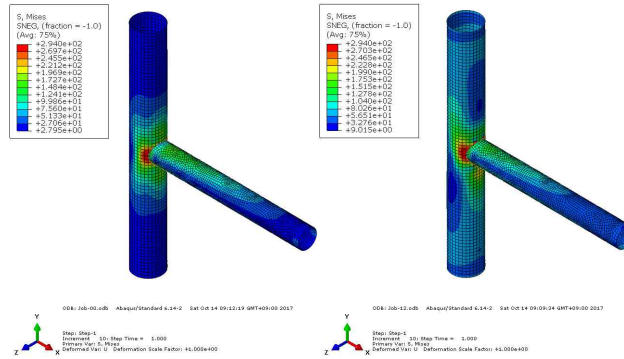


Fig. 3.1.25 T형 연결부의 응력분포(좌: No pressure, 우: 12 MPa)

- 내부 압력이 24 MPa인 경우 수직 변위 하중 13.5 mm에서 연결부의 수직 부재에서 항복 발생.
- 내부 압력이 36 MPa인 경우 수직 변위 하중 12 mm에서 연결부의 수직 부재에서 항복 발생.

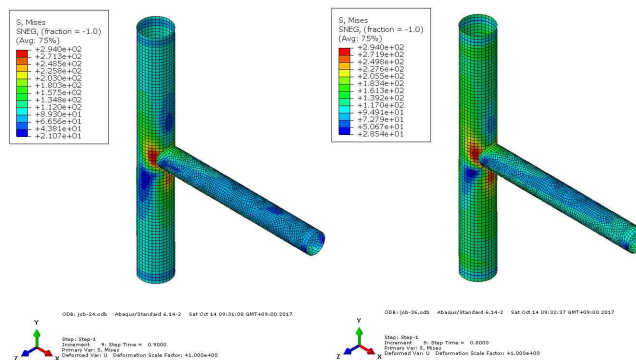


Fig. 3.1.26 T형 연결부의 응력분포(좌: 24 MPa, 우: 36 MPa)

- 내부 압력 48 MPa인 경우 수직 변위 하중 10.5 mm에서 연결부의 수직 부재에서 항복 발생.
- 내부 압력이 60 MPa인 경우 수직 변위 하중이 10 mm에서 연결부의 수직 부재에서 항복 발생.

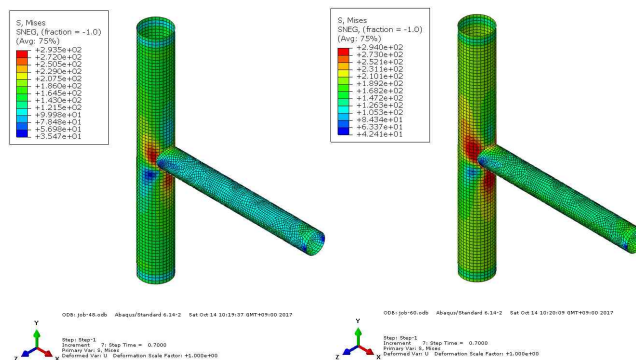


Fig. 3.1.27 T형 연결부의 응력분포(좌: 48 MPa, 우: 60 MPa)

- 내부 압력이 72 MPa인 경우 수직 변위 하중 9 mm에서 연결부의 수직 부재에서 항복 발생.

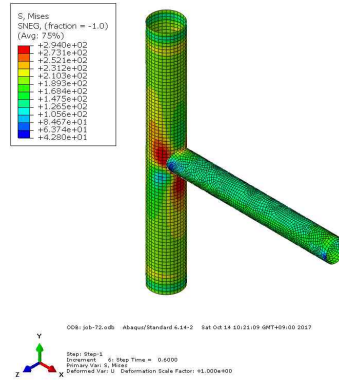


Fig. 3.1.28 T형 연결부의 응력분포(72 MPa)

b) L 형 연결부 해석 결과 (상향으로 하중이 작용할 경우)

- 내부 압력이 없는 경우 수직 변위 하중 35 mm에서 연결부 굴곡면에서 항복 발생. T형 연결 부와는 달리 상당히 큰 변위를 저항하였고, 절곡 부분에 최대 응력 발생.

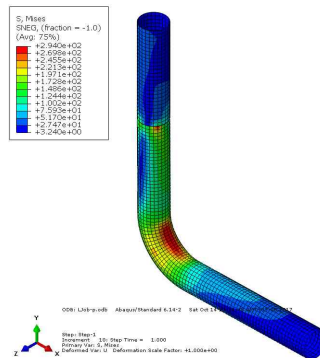


Fig. 3.1.29 상향하중 L형 연결부의 응력분포(No pressure)

- 내부 압력이 3 MPa인 경우 수직 변위 하중 27 mm에서 연결부 굴곡면에서 항복 발생.
- 내부 압력이 6 MPa인 경우 수직 변위 하중 21 mm에서 연결부 굴곡면에서 항복 발생.

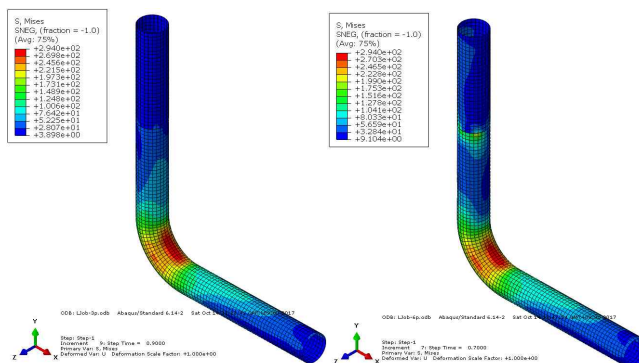


Fig. 3.1.30 상향하중 L형 연결부의 응력분포(좌: 3 MPa, 우: 6 MPa)>

- 내부 압력이 12 MPa인 경우 수직 변위 하중 6 mm에서 수직 파이프 경계조건 설정 단에서 먼저 항복 발생. 연결부 굴곡면에서의 항복은 수직 변위 하중 9 mm에서 발생.

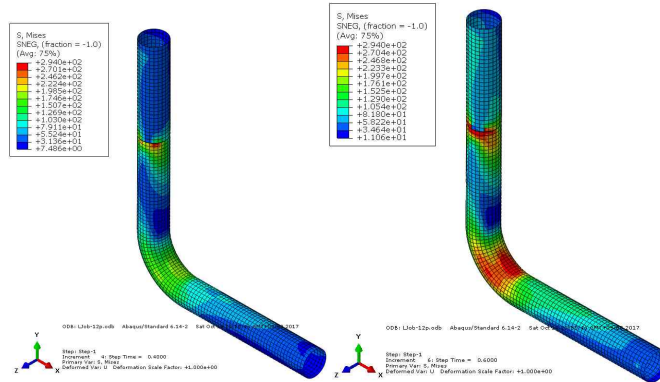


Fig. 3.1.31 상향하중 L형 연결부의 응력분포(12 MPa)>

- 내부 압력이 24 MPa인 경우 수직 변위 하중 3 mm에서 수직 파이프 경계조건 설정단에서 먼저 항복 발생 연결부 굴곡면에서의 항복은 수직 변위 하중 4.5 mm에서 발생.

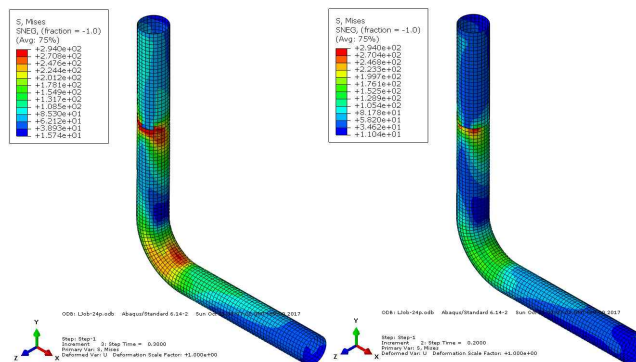


Fig. 3.1.32 상향하중 L형 연결부의 응력분포(24 MPa)>

- b) L 형 연결부 해석 결과 (하향으로 하중이 작용할 경우)

- 내부 압력이 없는 경우 수직 변위 하중 35 mm에서 연결부 굴곡면에서 항복 발생.

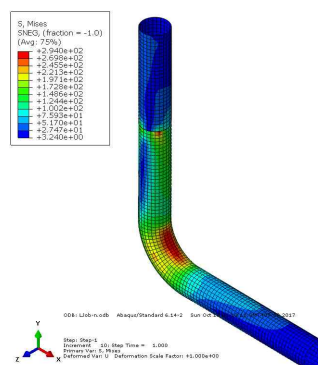


Fig. 3.1.33 하향하중 L형 연결부의 응력분포(No pressure)>

- 내부 압력이 3 MPa인 경우 수직 변위 하중 20 mm에서 수직 파이프 경계조건 설정 단에서 먼저 항복 발생. 연결부 굴곡면에서의 항복은 수직 변위 하중 40 mm에서 발생.

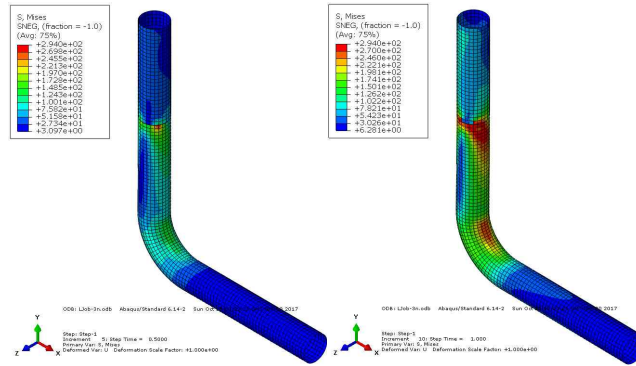


Fig. 3.1.34 하향하중 L형 연결부의 응력분포(3 MPa)>

- 내부 압력이 6 MPa인 경우 수직 변위 하중 8 mm에서 수직 파이프 경계조건 설정 단에서 먼저 항복 발생. 최대 수직 변위 40 mm에서도 연결부 굴곡면에서의 항복은 발생하지 않음.

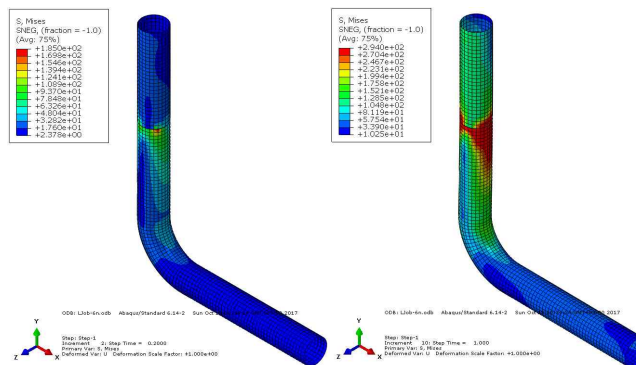


Fig. 3.1.35 하향하중 L형 연결부의 응력분포(6 MPa)>

- 내부 압력이 12 MPa인 경우 수직 변위 하중 4.5 mm에서 수직 파이프 경계조건 설정 단에서 먼저 항복 발생. 수직 변위 하중 12mm에서 연결부 굴곡면에서 항복이 발생.

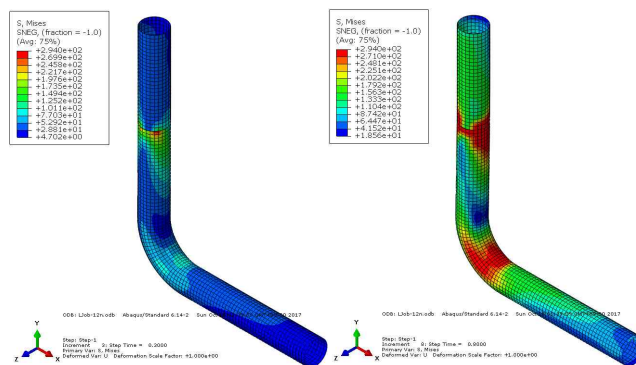


Fig. 3.1.36 하향하중 L형 연결부의 응력분포(12 MPa)>

- 내부 압력인 24인 경우 수직 변위 하중 3 mm에서 수직 파이프 경계조건 설정 단에서 먼저 항복 발생. 수직 변위 하중 6mm에서 연결부 굴곡면에서 항복 발생.

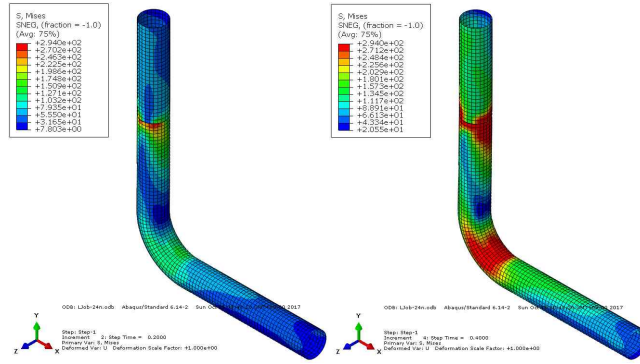


Fig. 3.1.37 하향하중 L형 연결부의 응력분포(24 MPa)>

- T형 연결부 경계조건에선 12MPa 보다 낮은 압력이 작용하는 경우는 크게 강도에 영향을 주지 않았으나 24MPa 이상의 내부 압력이 발생하면서 비선형 거동을 나타내고 있음.
- 특히 내부 압력이 증가할수록 소성거동이 빠르게 발상함을 보여주며 파이프라인의 T형 연결부 강도는 내부압력의 크기에 따라서 변화되는 것을 유의하여야 함.

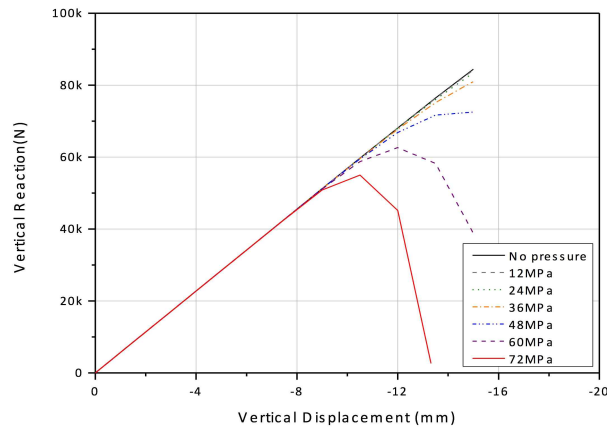
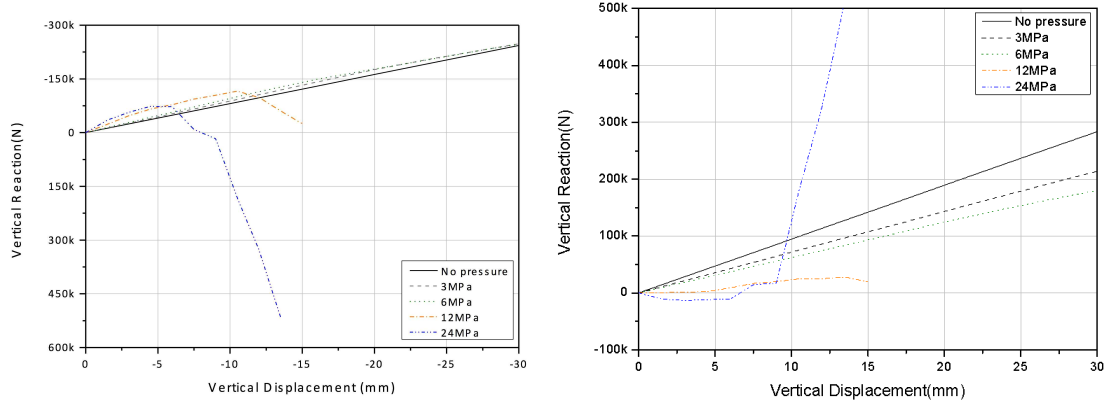


Fig. 3.1.38 T형 연결부의 수직변위-수직반력>

- L형 연결부 경계조건에선 우선 변위가 하향으로 작용하는 경우에서 내부 압력이 작은 경우는 소성 영역이 L형 연결부 굴곡면에서 발생하였고 거동이 직선으로 나타났으며 내부 압력이 큰 경우 소성 영역이 경계조건에서 먼저 발생하고 그 이후 굴곡면에서 소성이 발생.
- 따라서 내부 압력의 크기에 따라서 하중- 변위의 그래프 양상이 완전 다른 형태로 나타남.
- 변위가 상향으로 작용하는 경우에선 내부 압력이 작은 경우는 소성 영역이 L형 연결부 굴곡면에서 발생하였고 거동이 직선으로 나타났으며 내부 압력이 큰 경우 소성 영역이 경계조건에서 먼저 발생하고 그 이후 굴곡면에서 소성이 발생.
- 따라서 내부 압력의 크기에 따라 하중-변위의 그래프 양상이 완전히 다른 형태로 나타남. 또한 이 경우에는 전체 거동이 내부 압력에 민감하게 변동이 발생, 반력의 크기도 하향으로 변위를 작용한 경우보다 크게 계산됨.



하향 변위

상향 변위

Fig. 3.1.39 L형 연결부의 수직변위-수직반력

바. 내진거동 예측을 위한 데이터 통계분석

1) 파이프라인의 취약도해석기법

- 취약도 곡선은 구조물이 주어진 지진동 강도기준에 대해 지정된 손상정도를 충족하거나 초과할 조건부 확률을 의미.

$$f_{DS}(IM) = P(DS|IM) \quad (3.1.3)$$

- 여기서 DS는 파이프 구성요소에 대한 지정된 손상상태이고 IM은 지진동 강도치를 나타냄.

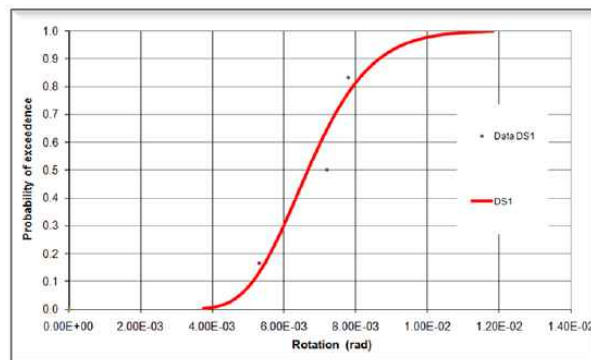


Fig. 3.1.40 파이프라인 Tee-Joint에 대한 경험적 취약도 곡선 사례

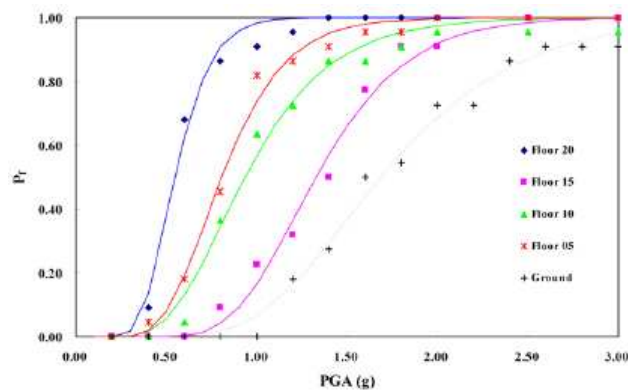


Fig. 3.1.41 파이프 시스템에 대한 해석적 취약도 곡선 사례

- 이때 취약도 곡선은 사전 정의된 손상상태를 고려하여 개발되며 시스템의 파괴확률은 내진 성능(SD)이 구조적 성능(SC)을 초과할 확률로써 나타냄.

$$P_f = (P \frac{S_D}{S_C}) < 1.0 \quad (3.1.4)$$

2) 파이핑 시스템에 대한 지진취약도 평가기법

- 세 가지 시스템 손상상태인 경미, 중간, 심각상태는 이전에 정의된 성분별 손상상태를 합성 함으로써 정의되며 결합확률 내진응답모델(Joint Probabilistic Seismic Demand Model; JPSDM)은 파이핑 시스템의 취약수준을 예측하는데 이용.
- 파이핑의 개별 손상상태(Fail_{system})에 도달하거나 초과하는 확률은 각 성분들이 수식 3.1.5에서 나타난 바와 같이 동일한 손상상태로 도달할 확률의 합으로 정의.

$$P[Fail_{system}] = \bigcup_{i=1}^n P[Fail_{component_i}] \quad (3.1.5)$$

- 파이핑 시스템의 공학적 성능 매개변수 조건을 사례조사를 통해 10가지 표로 분류(case1, case 2만 표시).

Pipe Name	a	b	β_{SDM}
ARMOVERS			
Armover-Tee Joint	0.016	1.69	0.59
Armover-Elbow Joint	0.009	1.46	0.49
BRANCH LINES			
1" Pipe	0.010	1.56	0.63
1.25" Pipe	0.009	1.32	0.60
1.5" Pipe	0.010	1.48	0.73
MAIN RUNS			
2" Pipe	0.005	1.76	0.72
2.5" Pipe	0.001	0.93	0.42
3" Pipe	0.001	1.09	0.59
4" Pipe	0.001	1.24	0.51
SUPPORTS			
Wire Restrainers	0.131	1.64	0.50
Hangers	0.057	1.90	0.60
Braces	0.040	1.23	0.50

Pipe Name	a	b	β_{SDM}
ARMOVERS			
Armover-Tee Joint	0.015	1.84	0.49
Armover-Elbow Joint	0.008	1.55	0.40
BRANCH LINES			
1" Pipe	0.008	1.65	0.47
1.25" Pipe	0.008	1.29	0.50
1.5" Pipe	0.008	1.39	0.57
MAIN RUNS			
2" Pipe	0.005	1.91	0.59
2.5" Pipe	0.001	0.90	0.34
3" Pipe	0.001	1.05	0.47
4" Pipe	0.001	1.32	0.45
SUPPORTS			
Wire Restrainers	0.127	1.85	0.47
Hangers	0.059	2.09	0.54

Fig. 3.1.42 파이프라인 설비에 대한 공학적 성능 매개변수 추정사례

- 파이핑 시스템 취약성의 민감함을 반영한 조건에 손상상태를 나타내는 취약도 곡선 제시

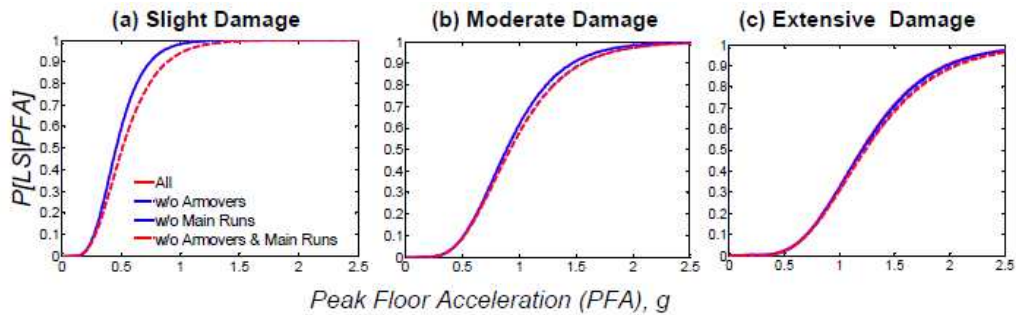


Fig. 3.1.43 상이한 파이핑 시스템 조건에 대한 시스템 취약도 곡선에

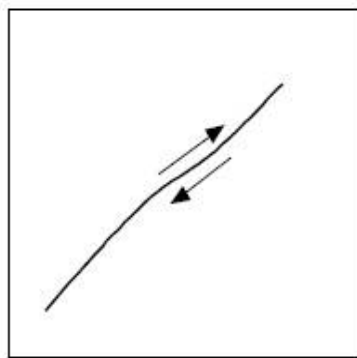
2. 한국형 파이프라인 내진 취약도를 위한 지진파 불확실성 분석 및 내진 취약도 분석

가. Seismic Hazard 분석

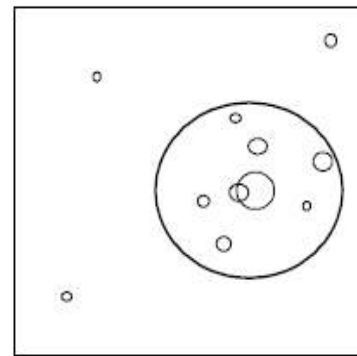
1) 지진재해도 구성요소

a) 지진원

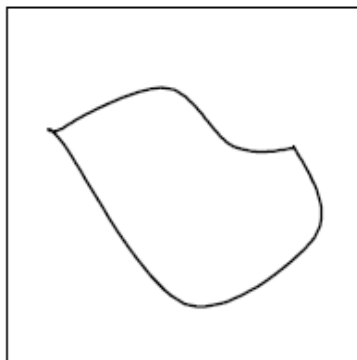
- 지진원 선정은 지진재해도를 계산함에 있어 필수요소.
- 지진원의 기하학적 특성은 점, 선, 면적 지진원등으로 구분.
- Fig. 3.2.1에서 Type 1은 단층 형태, Type 2~4는 면적 지진원으로 분류.
- 한반도는 대부분의 지역에서 단층구조와 지진활동의 상관관계가 명확하게 규명되어있지 않아 선지진원보다 일정한 면적을 갖는 면적 지진원이 고려.



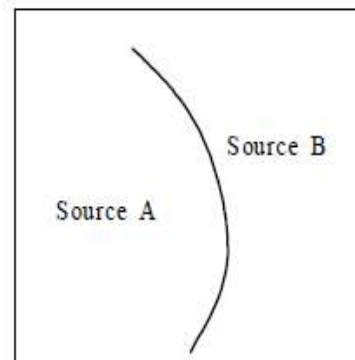
(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3



(d) Type 4

Fig. 3.2.1 PSHA 작성시 사용되는 지진원

b) 지진 규모 및 발생빈도

- 지진의 크기와 발생빈도를 나타내는 가장 일반적인 모델은 지수모델이며 Fig. 3.2.2, 수식 3.2.1의 Gutenberg-Richter 관계식으로 표현.

$$\log N = a - bM \quad (3.2.1)$$

- 지진의 규모 발생빈도 모델은 최소 규모($M_{\min}$) 이상의 지진발생률, 기울기 b , 최대 규모($M_{\max}$) 세 가지 요소에 의해 결정.
- 역사지진 자료, 지질 자료, 측지자료는 규모-발생빈도 공식을 유도.
- 역사지진 자료는 진앙 진도, 면적, 여러 규모가 섞여 있어 하나의 기준 규모로 환산 되어야 함.

- 지질자료는 경우에 따라서 지진의 발생횟수, 발생시각 및 크기에 큰 불확실성이 내포.
- 측지 자료는 단층의 이동률로부터 계산된 지진 발생률은 단층의 크기 및 최대 규모에 따라 변화.

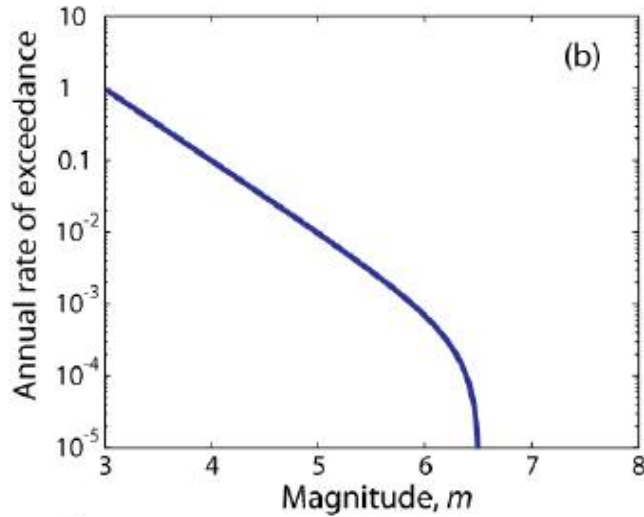


Fig. 3.2.2 규모-발생빈도의 관계 예

c) 감쇄식

- 감쇄식 또는 지진동 모델은 수식 3.2.2의 형태로써, 주어진 지진 규모와 거리에 대하여 부지에 미치는 영향을 계산.

$$(\ln a)_{mean} = c_0 + c_1 M + c_2 [R + g(M)] + c_3 R \quad (3.2.2)$$

여기서, a 는 최대 지반가속도, 속도 또는 변위, c 는 상수, M 은 규모, R 은 진앙 거리.

- 지진파의 거리에 따른 감쇄정도는 지역의 조건에 따라 다양한 특성을 지님.
- 지진파는 지하로 갈수록 물리량이 다양하게 변화하므로, 하나의 감쇄식으로 예측하기에는 불확실성이 매우 큼.

d) 논리수목

- 본 논리수목의 입력자료 작성 범위는 지진위험도 계산에 필요한 요소이며, 전문가로부터 입력자료를 도출하기 위한 원칙은 다음과 같다.
- 각각의 전문가에게 가중치를 부여.
- 각 전문가는 독립적으로 입력자료를 산정/결정.
- 자문가는 모든 입력자료에 대하여 복수안을 제시.
- 입력자료 값의 결정은 정량적 분석 결과에 기초하는 것을 원칙으로 하나, 자문가의 주관적 판단에 따라 정성적인 분석 결과를 반영.
- 입력자료의 도출에 이용된 자료의 해석 과정 및 입력자료 결정 절차가 문서상으로 명확히 제시.
- 논리수목은 지진원, 각 지진원별 지진활동변수 및 감쇄공식과 추가적으로 단층-지진규모 관

계식으로 구성.

2) 지진재해도 작성방법

- 지진재해도 제작은 각각의 독립적인 사건에 대한 전확률 이론(Total Probability Theorem)을 적용한 수식 3.2.3의 방정식을 적용.

$$Z(a) = \sum_n \nu_n \int_m \int_r P[A > a|m, r] f_{R_n|M_n}(r|m) f_{M_n}(m) dr dm \quad (3.2.3)$$

- 지진위험도는 특정 지점에서 지반가속도에 대한 연초과율로 나타내며 지진자료, 지진원, 감쇄식, 지진규모 등의 입력자료가 사용.
- 첫 번째 단계는 지진원 설정으로 해당지역의 지진학, 지질학, 지체구조적 특성을 고려하여 선지진원, 면지진원, 점지진원으로 설정.
- 두 번째 단계는 규모-발생빈도를 나타내는 관계식을 통하여 지진활동성을 결정.
- 세 번째 단계는 해당지역에서 지진에너지의 감쇄정도를 적절하게 나타내는 감쇄공식을 적용.
- 마지막 단계는 각각의 지진 규모 및 거리에 따라 다양한 준위의 가속도를 초과하는 지진의 연발생빈도를 평가하기 위해 부지의 최대지반가속도의 분포를 산정.
- 지진위험도는 한반도를 위도와 경도방향으로 간격을 나누어 각각의 격자점에서 입력 파라메타 값과 논리수목을 반영하면 최종적인 지진위험도가 제작.

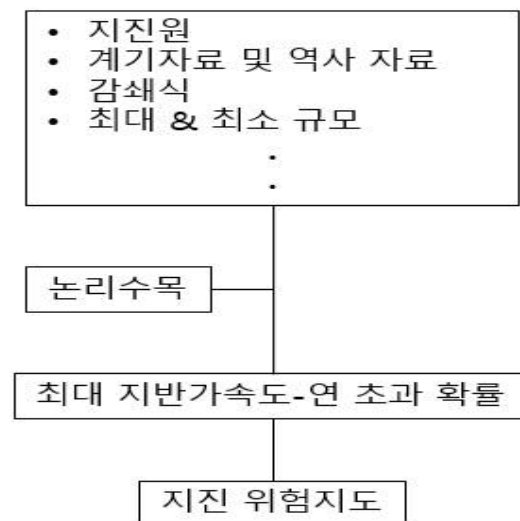
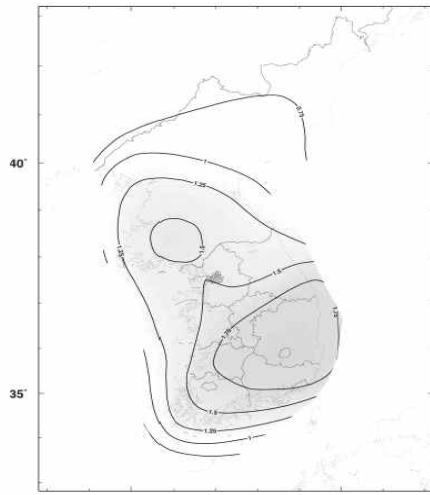


Fig. 3.2.3 지진재해도의 flow chart

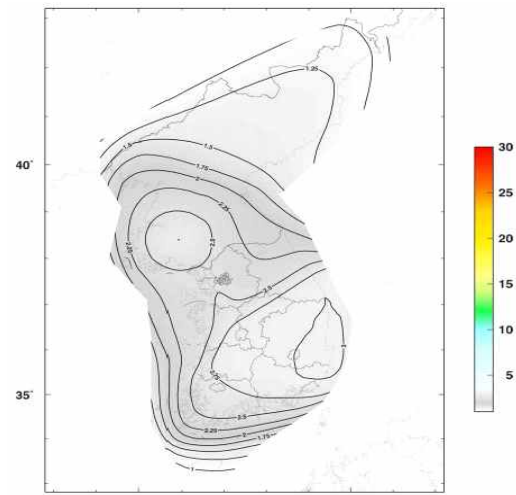
3) 지진재해도 실제적용사례

- 1997년에 제작된 지진위험지도는 규모 및 발생빈도에서 지질 및 측지 자료가 사용되지 않고, 역사 및 계기지진 자료를 이용.
- 당시 국내 지질환경을 충분히 반영할 수 있는 감쇄식의 연구가 불충분하여 미국 동부지역의 감쇄식을 사용.
- 2013년 소방방재청에서 지진재해도를 수정 및 보완.
- 지진위험도는 한반도를 위도와 경도 방향으로 각각 $0.1^\circ, 0.12^\circ$ 의 간격으로 격자를 생성하여 지진재해도를 제작.

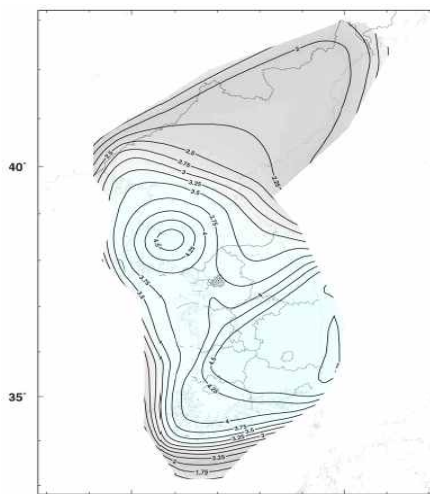
- 국내 지진재해도 제작에 사용된 감쇄식은 논리수목을 통해 제안된 8개의 감쇄식과 전문가들이 제안한 8개의 국내외 감쇄식을 사용.
- 각 전문가가 제시한 입력자료를 바탕으로 재현주기에 따른 지진재해도를 나타내는 최대지반가속도 분포를 Fig. 3.2.4와 같이 도식화.



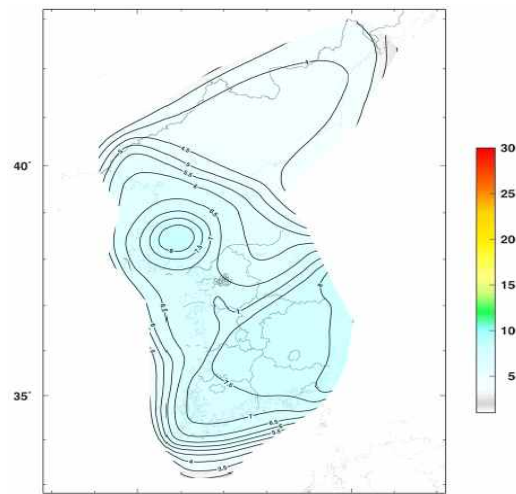
재현주기 50년 지진재해도



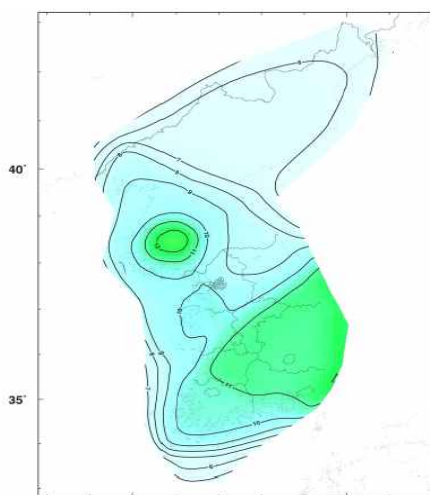
재현주기 100년 지진재해도



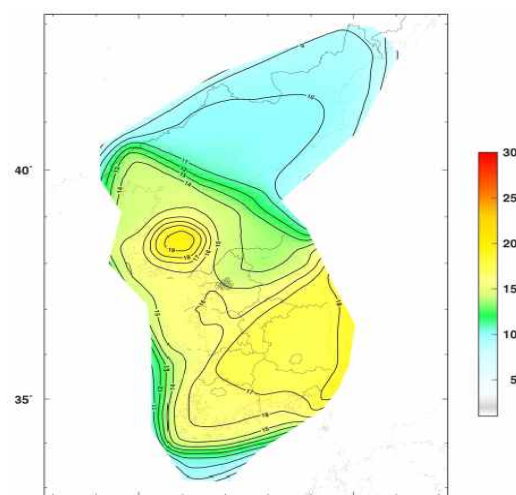
재현주기 200년 지진재해도



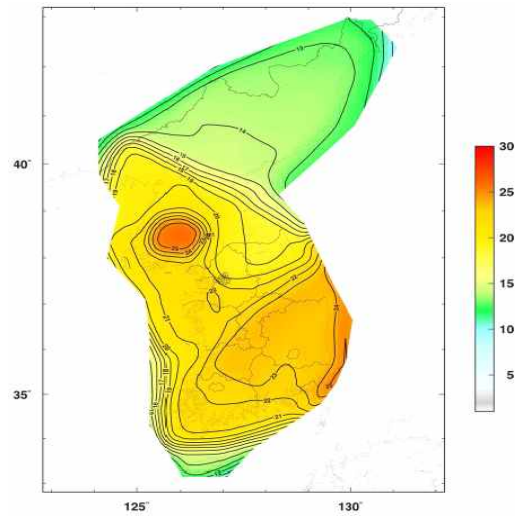
재현주기 500년 지진재해도



재현주기 1000년 지진재해도



재현주기 2400년 지진재해도



재현주기 4800년 지진재해도

Fig. 3.2.4 재현주기 별 국내 지진재해도

나. Ground Motion Set 구축

- 미래 발생될 지진은 과거에 발생한 지진과 같은 지진이 발생할 가능성은 0%에 가깝기 때문에 진앙거리, 지진의 주기 및 지속시간, 단층의 파괴메커니즘 등에 따라 불확실성을 포함하여 Ground Motion Set을 구성해야함.
- 본 연구에서는 다양한 불확실성을 고려하기 위해 국내에서 발생한 경주 및 포항 지진을 포함하여 세계 각지에서 발생한 21개의 지진을 고려하여 Seismic Ground Motion을 구축.
- 구축된 Seismic Ground Motion의 자세한 정보는 Table. 3.2.1에 정리하였으며 Fig. 3.2.5는 Normalized Spectral Acceleration을 표현.

Table. 3.2.1 Seismic Ground Motion

No.	Date	Seismic Events	Location	Magnitude (M_w)	PGA(g)
1	January 17, 1994	Northridge	Beverly Hills, USA	6.7	0.3265
2	January 17, 1994	Northridge	Canyon Country, USA	6.7	0.4820
3	November 12, 1999	Duzce	Bolu, Turkey	7.1	0.2025
4	October 16, 1999	Hector Mine	Hector	7.1	0.2656
5	October 15, 1979	Imperial Valley	Delta	6.5	0.1450
6	October 15, 1979	Imperial Valley	El Centro Array #11	6.5	0.3796
7	January 16, 1995	Kobe	Nishi-Akashi Japan	6.9	0.5027
8	January 16, 1995	Kobe	Shin-Osaka Japan	6.9	0.0587
9	August 17, 1999	Kocaeli	Duzce	7.5	0.3579
10	August 17, 1999	Kocaeli	Arcelik	7.5	0.2188
11	June 28, 1992	Landers	Yermo Fire Station	7.3	0.1515
12	September 12, 2016	Gyeongju	Gyeongju	5.8	0.4426
13	October 18, 1989	Loma Prieta	Capitola	6.9	0.5285
14	October 18, 1989	Loma Prieta	Gilroy Array	6.9	0.3674
15	July 20, 1990	Manjil	Manjil, Iran	7.4	0.4964
16	November 24, 1987	Superstition Hills	El Centro IMP Co Center	6.5	0.3579
17	November 15, 2017	Pohang	Pohang	5.4	0.2830
18	April 25, 1992	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass FF	7.0	0.1954
19	February 09, 1971	San Fernando	LA Hollywood Stor Lot	6.6	0.1359
20	January 17, 1994	Northridge	Beverly Hills 14145 Mulh	6.7	0.4158
21	September 20, 1999	Chi-CHI	CHY 101 Taiwan	7.5	0.5120

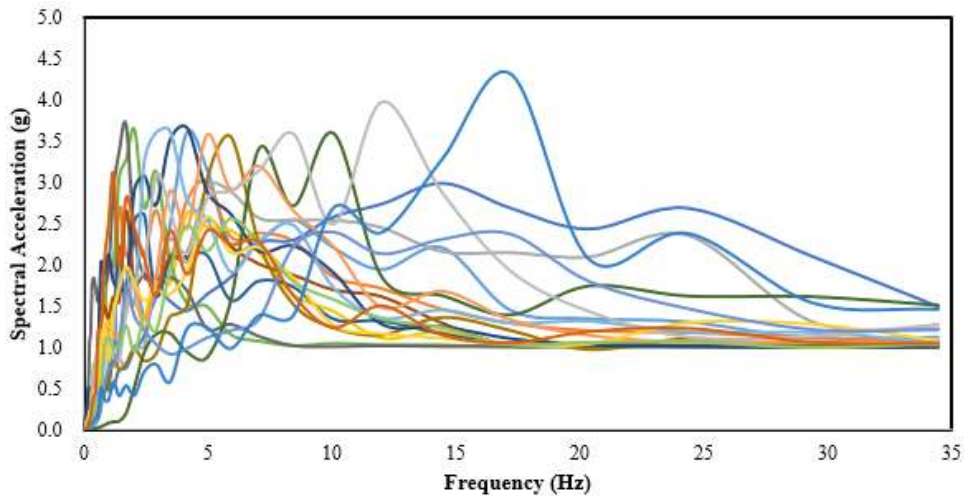


Fig. 3.2.5 Normalized Spectral Acceleration

다. 한국형 파이프라인의 내진 취약도 분석

1) 파이프라인의 지진피해 사례

- Taghavi and Miranda(2003)의 Pacific Earthquake Engineering Research(PEER) 연구 보고서에서 병원, 공공기관, 호텔 등의 건설투자비용 중 구조적 요소, 비구조적 요소, 장비 등의 구성요소가 차지하는 비율을 분석하였으며 그림 3.2.6과 같이 비구조적 요소에 투자되는 비용이 상당히 많은 것으로 나타남.
- 이것은 지진 하중으로 인해 구조물 전체에 피해가 발생하였을 때 비구조적 요소에도 상당한 피해가 발생할 수 있다는 것을 의미할 수 있음.

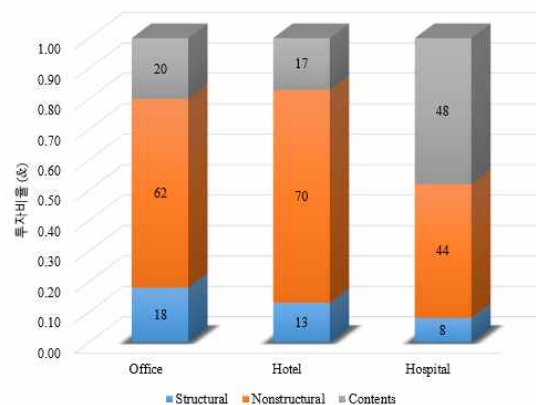


Fig. 3.2.6 건설비용 중 각 요소의 투자비율

- 1994년 미국의 Northridge에서 발생한 지진으로 인해 Olive View Hospital의 배관 손상으로 인해 홍수 발생으로 치료중인 환자가 대피하는 상황이 발생하였고 1999년 대만의 Chi-Chi 지진으로 인해 한 병원의 배관이 파손되어 누수가 발생하였고 이로인해 의료장비가 손상되어 환자의 치료가 중단되는 상황이 발생함.
- Japan Nuclear Energy Safety Organization(JNES)와 Nuclear Power Engineering Corporation(NUPEC)의 연구에 따르면 지진 하중에 의한 배관의 손상형태는 저진동수 피로파괴인 것으로 나타났으며 Toubul(1995)는 진동대 실험을 통해 배관 시스템의 동적 거동을 분석하였으며 이 때 곡관에 소성변형이 발생하여 배관시스템의 파괴가 발생하는 것으로 나타

남.

- 일본 소방방재청의 조사 자료에 따르면 마기야기현 지진으로 인해 배관의 파손 및 균열이 53건, 지지부 파손 및 균열이 2건 펌프 파손이 6건, 쿠시로 지진으로 인해 배관의 파손 및 누수 등이 12건, 산리쿠해 지진으로 인해 파관 파손 및 이음파손 등이 총 10건, 효고현 남부 지진으로 인해 배관 파손이 총 23건이 발생한 것으로 나타남.
- 배관의 직접적인 손상원인은 천장과 배관의 흔들림의 차이, 서로다른 직경의 연결부의 동적 거동 특성 불일치, 지진분리이음의 미설치로 인한 진동 증가, T-joint의 각 분기된 배관의 진동과 변위의 차이 등으로 인한 것으로 나타났으며 지지 및 고정 장치의 미비, 나사부의 손상, 타 부재의 이동 및 낙하 등으로 인해 간접적인 피해가 발생한 것으로 조사됨.
- 국내에서는 2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진으로 인해 많은 피해가 발생하였으며 두 지진 모두 구조적 요소의 피해보다 비구조적 요소의 피해가 두드러진 것으로 나타났으며 비구조적 피해 중 배관의 손상도 포함되어 있는 것으로 조사됨.
- 경주지진으로 인해 포항의 한 아파트의 배관의 손상되어 누수가 발생하였고 포항지진으로 인해 그림과 같이 건물 외벽에 설치된 배관이 각 층의 서로 다른 변위로 인해 피해를 받음.

2) 내진 취약도 분석의 정의

- 지진 취약도 분석은 1980년대 원자력 발전소 구성요소의 파괴 빈도와 PGA 사이의 확률론적 함수 관계로 최초로 정의.
- 자연재해 발생 시 전체 시스템 혹은 구성요소의 거동이 각 한계상태에 도달하거나 초과할 확률을 수학적으로 정의한 것을 의미.
- 지진 취약도는 Seismic Hazard Analysis를 선행적으로 분석함으로써 지진파의 불확실성을 고려할 수 있으며 시스템에 적용된 재료의 특성 혹은 불확실성 등 또한 FEM 해석 시 적용하여 지진 취약도 평가에 기여.
- 지진 취약도 함수는 일반적으로 누적분포 함수(CDF)로 정의될 수 있으며 그 형태는 수식 3.2.4와 같음.

$$P_d(x) = P[D \geq d | X = x] = \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta_d)}{\beta_d}\right) \quad (3.2.4)$$
$$\therefore d \in [1, 2, 3, \dots, N_d]$$

- 지진 취약도 분석은 성능기반 내진설계개념에 적용할 수 있으며 지진 발생 후 갑작스런 쓰나미 발생 등의 복합재난에 대한 안전성 확보 및 평가에 많은 기여를 할 수 있음.
- 일반적으로 지진 취약도 평가는 경험적, 분석적, 판단적 취약도 평가로 나뉘 수 있으며 이 중 두 개 이상을 결합하여 복합적 취약도 평가를 수행할 수 있음.
- 본 연구에서는 Monte-Carlo Simulation(MCS) 기반의 해석적 지진 취약도 분석을 수행.

3) 한국형 파이프라인의 내진 취약도 분석

- 한국형 파이프라인의 내진 취약도 분석 시 사용된 모델은 아래 Fig. 3.2.6과 같이 Opensees를 이용하여 수치해석 모델을 구축하였으며 1차년도에서 실험적 연구를 통해 검증된 T-Joint 모델을 적용하여 구축됨.
- Fig. 3.2.6과 같이 3층과 4층 사이에 설치된 파이프라인 시스템에 대해 시간이력해석을 수

행하고 그 결과를 바탕으로 지진 취약도 분석을 수행함.

- 지진 취약도 분석은 Fig. 3.2.7의 3층 파이프라인의 왼쪽에서부터 순서대로 104, 114, 125, 135, 146, 157의 T-Joint와 선형/비선형 모델에 대해 수행하여 결과를 비교함.
- Fig. 3.2.8은 3층에 위치한 각 T-Joint 선형/비선형 모델의 지진 취약도 곡선을 비교하여 나타냈으며 4층의 파이프라인은 파괴가 발생하지 않는 것으로 나타남.
- 이는 4층의 파이프라인의 직경이 1in로 매우 Flexible한 거동을 보이기 때문인 것으로 판단 됨.
- 선형 시스템의 경우 대부분의 T-Joint에서 PGA 0.3g를 넘어서면서 파괴가 발생하는 것으로 나타남.
- 비선형 시스템의 경우 PGA가 1.0g를 넘어서면서 파괴가 발생하는 것으로 나타났으며 이는 파이프라인의 요소별 상호연계성으로 인해 에너지가 소산되었기 때문이라 판단됨.

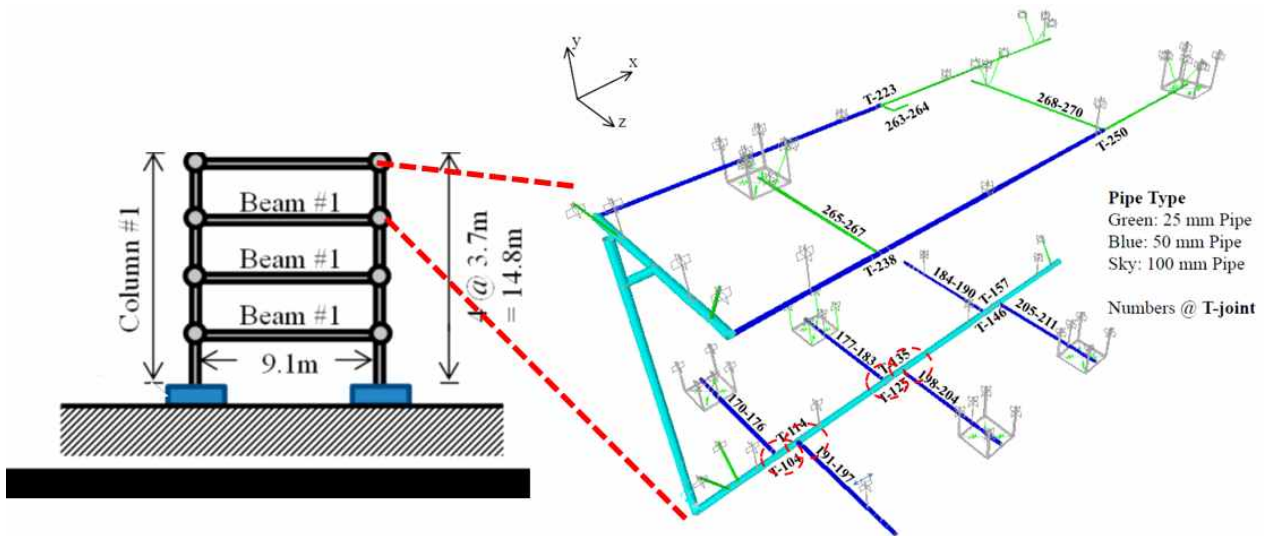
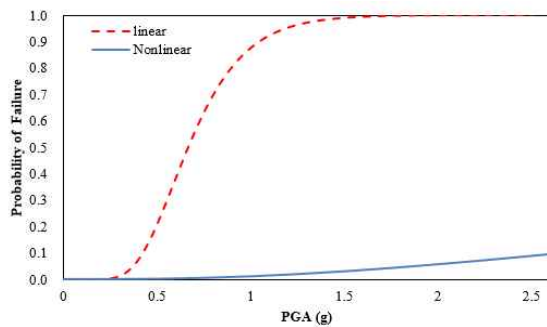
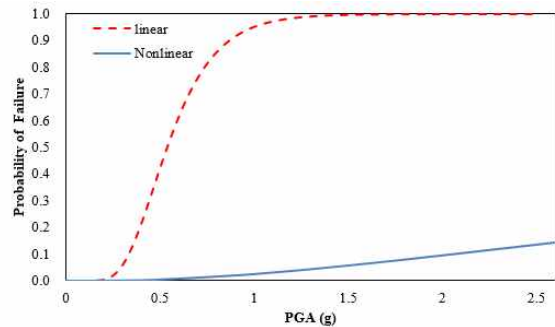


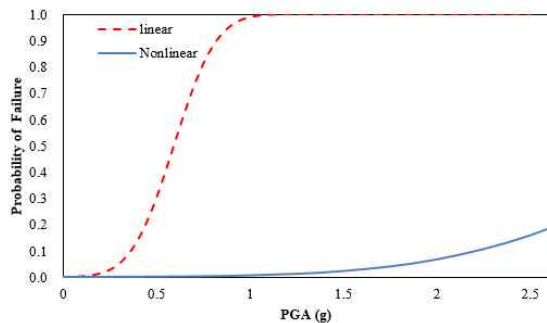
Fig. 3.2.7 파이프라인의 유한요소 해석 모델



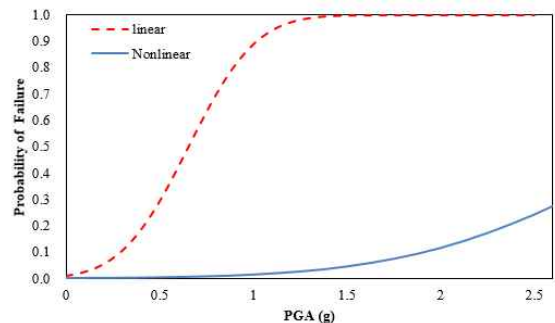
(a) T-104



(b) T-114



(c) T-125



(d) T-135

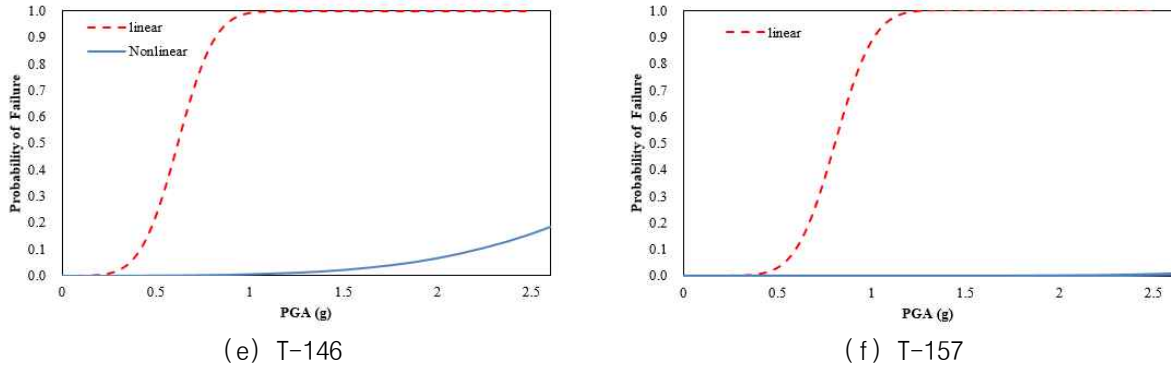


Fig. 3.2.8 T-Joint의 선형 및 비선형 모델 지진 취약도 분석

라. Bayesian Approach에 의한 내진 취약도 분석

1) Bayesian Approach

- 본 연구에서는 MCS 기반의 지진 취약도 분석 이외에 Bayesian Updating을 적용한 지진 취약도 분석을 수행하였으며 일반적인 Bayesian Updating의 절차는 아래와 같음.
- 설계 기반 지진 강도로 규모가 조정된 Seismic Motion을 구축하고 실험적으로 검증된 유한요소 모델 구축.
- 구축된 유한요소 모델의 단일 비선형 시간이력 해석 수행.
- 안전계수 방법(Safety Factor Method, SFM)을 사용하여 Prior Seismic Fragility Curve(SFC) 구축.
- Prior SFC를 기반으로 몇몇 Seismic Motion을 결정하여 추가적인 시간이력 해석을 수행
- 파괴확률 평가.
- Bayesian Updating을 사용하여 추가적인 정보를 기반으로 Prior SFC Update.
- Bayesian Approach는 현재 Posterior를 이용하여 다음 단계의 Prior를 추정하는 재귀적(Recursive) 방법으로 진행.
- 이 접근법의 경우 초기값 설정이 수렴시간에 큰 영향을 미치므로 초기값을 결정이 가장 중요.
- 유연하게 변화하는 대상에 대해서도 추정이 가능하며 더 적은 데이터로 빠르게 확률을 추정할 수 있기 때문에 Computational Coast가 감소되는 이점이 존재.
- Bayesian Approach 기반의 지진 취약도 평가는 아래와 같은 함수를 통해 Prior에서 Posterior로 Updating을 반복적인 평가가능.

$$P_f^{post}(a|d) = \int P_f^{prior}(a;\theta) f(\theta|d) d\theta \quad (3.2.5)$$

$$f(\theta|d) = \frac{f(d|\theta)f(\theta)}{\int f(d|\theta)f(\theta)d\theta} : \text{Posterior PDF} \quad (3.2.6)$$

$$f(d|\theta) = \prod_{i=1}^k \binom{n_i}{r_i} (P_f^{prior}(a_i;\theta))^{r_i} (1 - P_f^{prior}(a_i;\theta))^{n_i - r_i} \quad (3.2.7)$$

여기서, $f(\theta)$ =Prior PDF

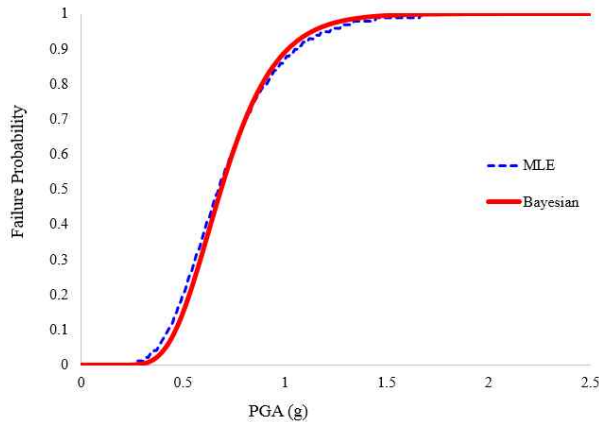
a= PGA or SA or PGV or Mw

2) Bayesian Approach를 적용한 내진 취약도 분석

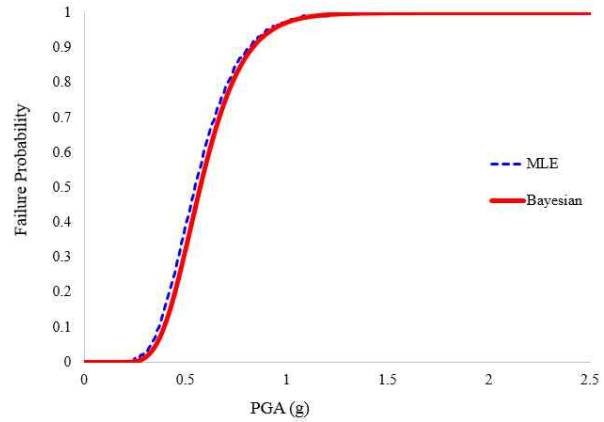
- Bayesian Approach를 적용한 내진 취약도 분석은 선형/비선형 T-Joint에 대해 수행하였으며 각 시스템의 MLE Method를 사용한 취약도 곡선과 Bayesian Updating을 사용한 취약도 곡선을 비교함.
- Bayesian Approach를 적용한 내진 취약도 곡선의 경우 0.6g와 1.0g의 해석 데이터를 이용하여 추정함.
- MLE Method의 경우 231번의 해석을 수행하였지만 Bayesian Approach 적용 시 43번의 해석

데이터를 이용하여 추정 한 취약도 곡선이 MLE 취약도 곡선과 거의 유사한 형태로 나타남.

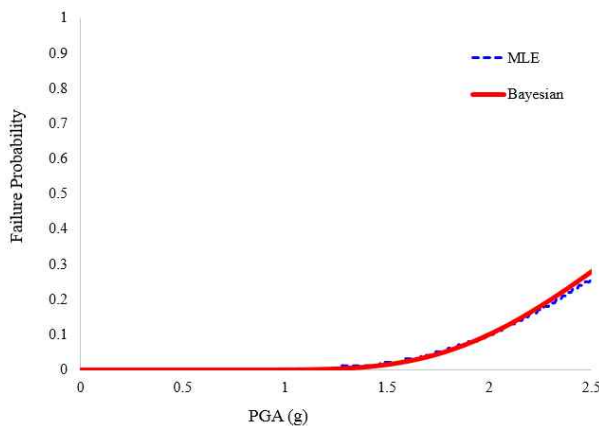
- 본 연구 결과를 보았을 때 MLE Method 보단 Bayesian Approach가 Computernal Coast를 80% 감소시킬 수 있는 것으로 나타남.



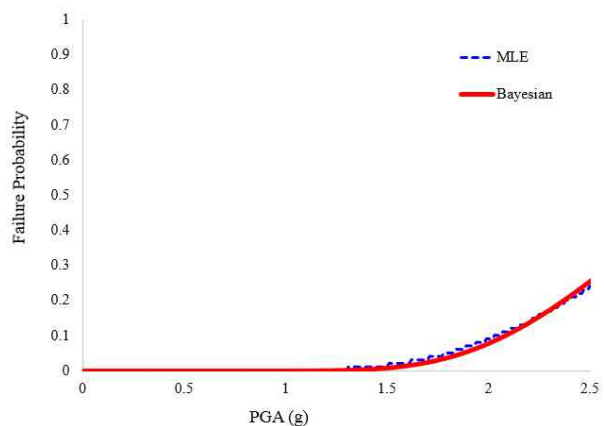
(a) T-104의 선형 모델



(b) T-125의 선형 모델



(c) T-104의 비선형 모델



(d) T-125의 비선형 모델

Fig. 3.2.9 MLE Method와 Bayesian Approach 적용에 의한 지진 취약도 곡선 비교

3. 한국형 파이프라인 내진거동 평가 및 안전성 개선을 위한 보수/보강 기법

가. 실제 시설물 시공조건을 고려한 파이프라인 내진 해석 및 거동 평가

1) 교량 구조물 내 설치된 파이프라인의 내진 거동 평가

- 교량 구조물 내 설치된 파이프라인의 거동을 분석하기 위해 대상 구조물을 강릉시에 위치한 철도교로 선정하였으며 이 교량의 총 연장은 220m, 교각의 거리는 20m.
- 교량에 설치된 관은 상수도관으로써 직경 6.625in, 내경 0.280in, 탄성계수 200,000MPa의 강관.
- 내진 거동 평가를 위해 Pipe Stress Platform을 사용하여 El-Centro 응답스펙트럼을 Z축 방향으로 적용한 Spectrum 해석을 수행.
- 해석 변수로 행거와 브레이싱 사이의 각도에 따라 90°, 60°, 45°, 0°로 변화하여 각 Case에 대해 분석.



Fig. 3.3.1 교량에 설치된 대상 배관 시스템

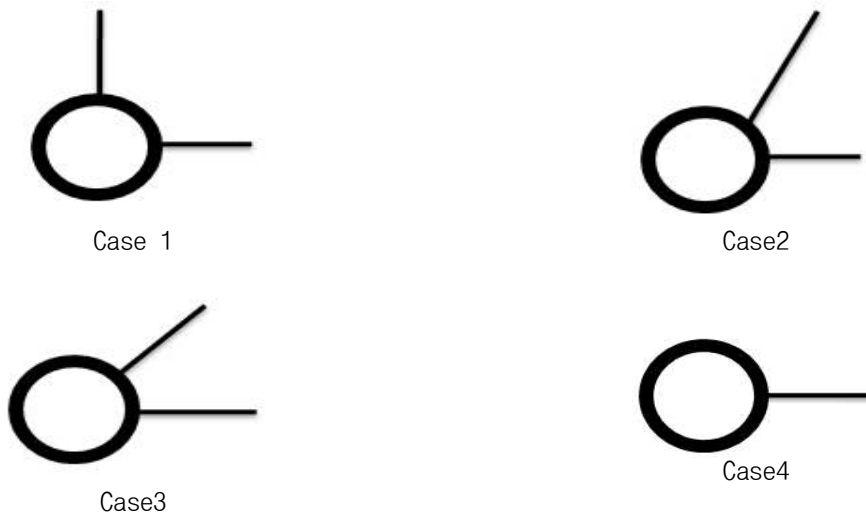


Fig. 3.3.2 보강 Case

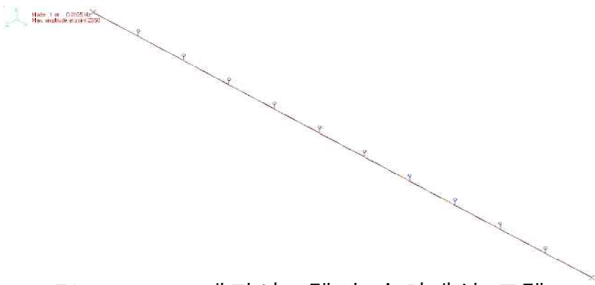


Fig. 3.3.3 배관시스템의 수치해석 모델

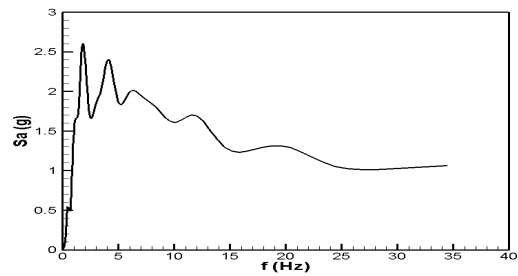


Fig. 3.3.4 El-Centro 지진의 Spectral Acceleration

- 해석결과는 아래 Table. 3.3.1과 같으며 각 Case의 변형 형상은 fig. 3.3.5와 같음.
- Spectrum 해석결과 Case1 (90°) 가장 큰 결과값이 나타났으며 Case2~Case4는 거의 동일한 결과로 나타남.
- 해석결과를 통해 브레이싱을 추가적으로 설치하여 1차모드의 주기를 증가시키는 것이 보강 효과가 좋을 것으로 나타났으며 특히 90° 미만의 각도로 브레이싱을 설치하는 것이 가장 효율적인 것으로 판단.

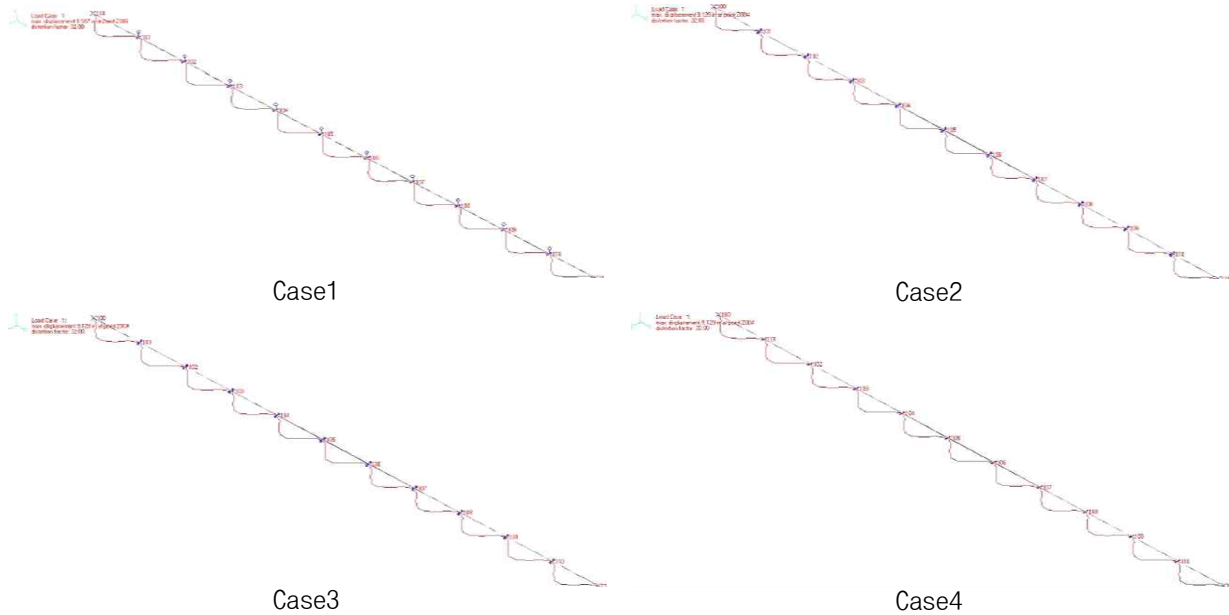


Fig. 3.3.5 보강 Case 별 변형 형상

Table. 3.3.1 보강 Case 별 해석결과

	변위 (mm)	하중 (N)	모멘트 (N-m)	응력 (MPa)
case 1	242.75	9,339.19	39,654	385
case 2	231.88	9,214.72	39,382	382
case 3	231.88	9,214.72	39,382	382
case 4	231.88	9,214.72	39,382	382

2) 빌딩 구조물 내 설치된 수계 파이프시스템의 내진 거동 평가

- 구조물 내 설치된 스프링클러 시스템의 내진 거동 평가를 위해 강릉원주대학교의 한 건물의 스프링클러 시스템을 대상으로 Spectrum 해석을 수행.
- 건물의 가장 윗층인 5층의 스프링클러 시스템이 대상이며 그중 가장 지배적인 거동을 보일 것으로 판단되는 중앙을 Fig. 3.3.6과 같이 Pipe Stress Platform을 이용하여 모델링.
- 배관의 직경은 127mm와 25mm, 탄성계수는 200,000MPa인 강관을 사용하였으며 스프링클러 시스템 안에 물이 가득 차 있다는 것으로 고려하여 단위면적 당 하중을 459.13N/m로 적용.
- 입력 Spectrum의 방향을 X축과 Z축으로 각각 적용하였을 때 거동의 변화를 보고자 하였으며 브레이싱의 보강 유무에 따른 거동의 변화를 분석.
- 입력 Spectrum은 El-Centro 지진의 Spectrum과 KBC2009의 설계 스펙트럼(Fig. 3.3.7)을 이용하였으며 공진상태일 때의 거동을 파악하기 위해 Fig. 3.3.8과 같이 인위적인 공진스펙트럼을 생성하여 Spectrum 해석을 수행.
- 각 해석 Case는 Table. 3.3.2에 요약.

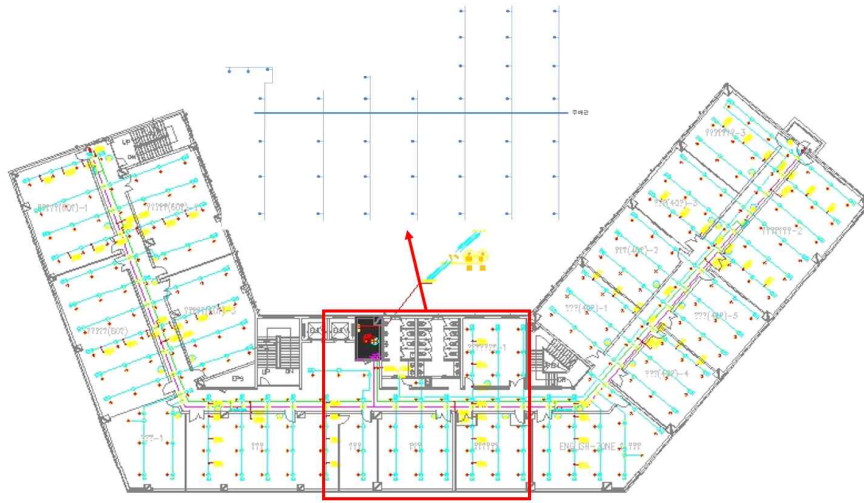


Fig. 3.3.6 대상구조물의 스프링클러 설계도면

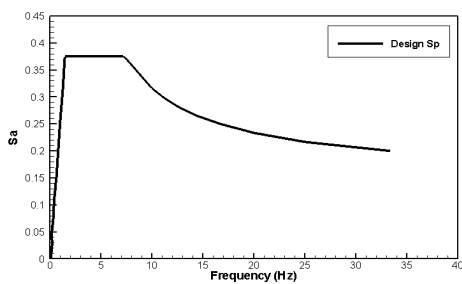


Fig. 3.3.7 KBC2009의 설계 스펙트럼

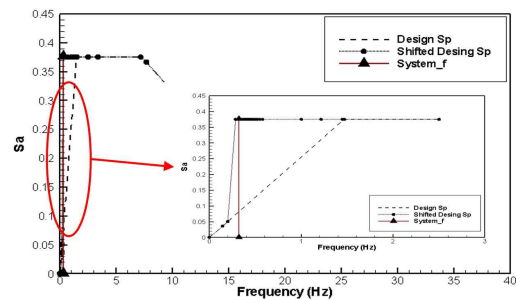


Fig. 3.3.8 공진 설계 스펙트럼

Table. 3.3.2 해석 Case

구분	상세
Case1	입력 지진파 방향 : X축
Case2	입력 지진파 방향 : X축, 브레이싱 보강
Case3	입력 지진파 방향 : Z축
Case4	입력 지진파 방향 : Z축, 브레이싱 보강
Case5	설계 스펙트럼
Case6	공진 설계 스펙트럼
Case7	공진 설계 스펙트럼, 브레이싱 보강

- 변위 결과를 전체 Case에 대해 비교하였을 때 공진 설계 스펙트럼 적용(Case 6) 시 Z축 방향의 변위가 가장 큰 값을 갖는 것으로 나타났으며 X축 방향의 경우 Case 1과 Case 6이 비슷한 것으로 나타남.
- 보강을 실시하지 않은 스프링클러 시스템(Case1, Case3, Case5, Case6)에서 최대 변위가 200mm 이상 발생하였으며 이는 지진 발생 시 대상 스프링클러 시스템에 많은 피해가 발생할 것으로 판단.
- 보강 전과 보강 후의 X 축 변위를 비교하였을 때 평균적으로 약 90% 정도로 변위가 감소하는 것으로 나타났으며 Z축 변위 또한 약 90% 가량 감소하는 것으로 나타남.
- 또한 보강 전 후에 스프링클러에서 발생한 응력을 비교하였을 때 보강 후 평균적으로 약 70%의 응력이 감소하는 것으로 나타남.

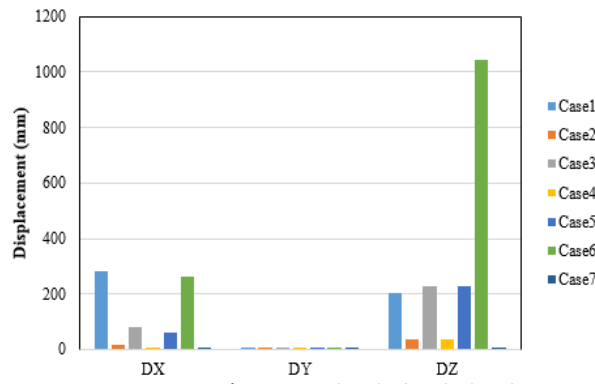


Fig. 3.3.9 각 Case 별 최대 변위 비교

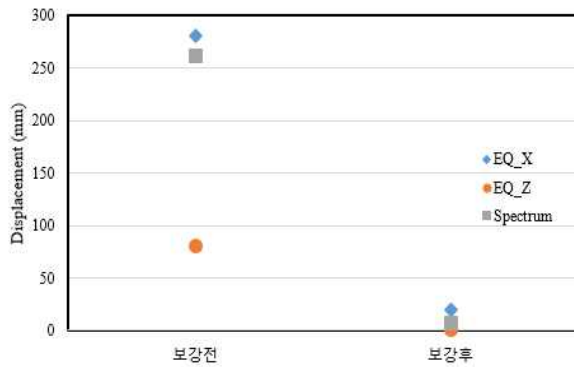


Fig. 3.3.10 보강 전후의 X방향 변위 비교

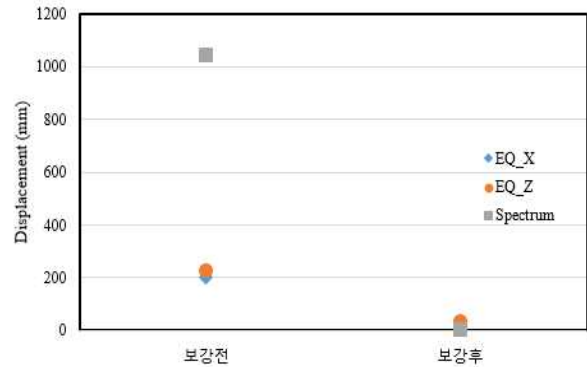


Fig. 3.3.11 보강 전후의 Z방향 변위 비교

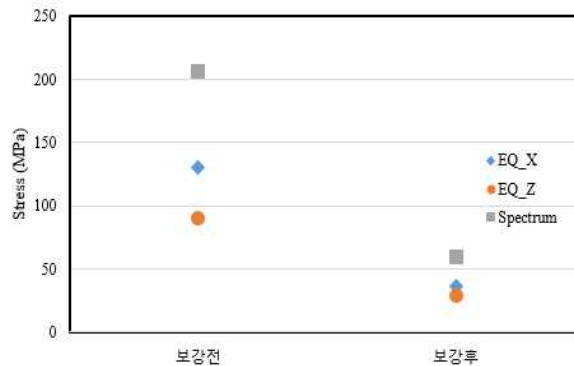


Fig. 3.3.12 보강 전후의 최대 응력 비교

나. 각 요소의 상호연계에 의한 조인트의 실험적 거동 평가

1) Grooved Joint가 적용된 수계소화설비 수직배관의 내진성능평가

- 지진에 의한 건축 구조물의 층간 상대변위에 따른 배관 거동을 검토하기 위해 건물 1개 층에 해당하는 배관 시스템을 대상설비로 규정.
- 실험 대상 설비는 Grooved Joint(고정식 커플링 100A), 배관용 탄소 강관, Elbow, Tee로 구성.
- 실험대상설비의 층간변위에 대한 성능을 확인하고자 하는 주요 연결부에 Grooved Joint를 적용하였으며 Grooved Joint의 자세한 정보는 Table. 3.3.3에 정리하여 나타냄.

Table. 3.3.3 주요 실험체의 구성 조건

Part Name	Model Name	Specification	Material	Quantity	Photo
Grooved Joint	고정식 커플링 100A	Standard Rigid	SUS 304	9	
		Coupling	Stainless Steel		
		114.3mm	Dimensions (mm)		
		Length (L)	Width (W)	Height (H)	
		180	143	51	

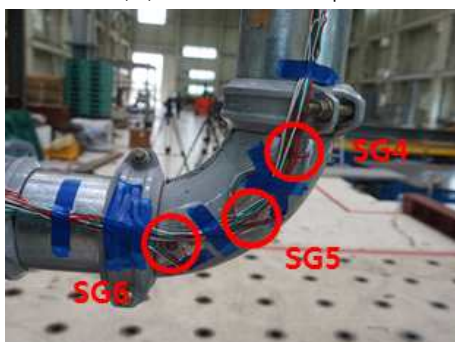
- 실제 배관계통이 설치되는 조건을 충분히 구현하여 설치하였으며 2MPa의 수압을 가압한 상태에서 실험하여 누수 등의 파괴상태를 확인할 수 있도록 실험을 수행.
- 실제 시공 조건을 고려하기 위해 층간 변위 환경을 모사할 수 있는 강재프레임에 대상설비를 설치하였으며 강재프레임은 반력바닥에 M45 볼트로 고정.
- 허용 층간변위는 국내 건축구조 기준에서 제시한 최대 허용층간변위 $0.02h$ (층 높이의 2%)를 만족하기 위해 600mm/min의 속도로 $\pm 60\text{mm}$ 의 정현파를 15회 반복 적용하여 실험을 수행.
- 대상설비의 실험 전, 후의 외부 변형 및 파손상태(누수, 균열, 부품의 탈락 및 파손 등), 고정 볼트 체결의 적절성 등을 육안으로 검사.
- 또한 Elbow, Tee Joint에 Strain Gauge를 설치하여 배관의 변형률을 측정하였으며 반력바닥에 Load Cell과 LVDT를 설치하여 가력 하중 및 변위를 계측.
- 실험 종료 후 육안검사 결과 실험대상설비의 구성요소인 배관용 탄소강관, Grooved Joint, Elbow, Tee의 외부변형 및 누수 등은 관측되지 않음.
- Actuator에서 측정된 최대 반력은 2.4172kN, 최소 반력은 -2.4978kN으로 나타났으며 Elbow 및 Tee에서 계측된 변형률은 Table. 3.3.4에 정리하여 나타냄.
- 계측된 변형률을 이용하여 Von-Mises Stress를 계산하였으며 계산된 최대 Von-Mises는 Table. 3.3.5에 정리.



(a) 실험체 set-up



(b) Upper Elbow의 측정 위치



(c) Under Elbow의 측정 위치



(d) Tee의 측정 위치

Fig. 3.3.13 내진성능평가 실험체 구성

Table. 3.3.4 측정된 변형률

Location	Orientation	Measured Strain	
		Max.	Min.
SG1	R(Axial)	1.4821e-4	-5.3510e-5
	W(Hoop)	2.1681e-4	-7.0090e-5
	G (45°)	3.2808e-4	-2.4591e-4
SG2	R(Axial)	3.0038e-4	-2.6320e-4
	W(Hoop)	1.4006e-4	-8.2400e-6
	G (45°)	2.4732e-4	-1.8541e-4
SG3	R(Axial)	1.0317e-4	-1.4440e-4
	W(Hoop)	2.5963e-4	-8.2390e-5
	G (45°)	6.5700e-5	-6.1590e-5
SG4	R(Axial)	1.1510e-4	-3.6980e-5
	W(Hoop)	5.3887e-4	-8.2210e-5
	G (45°)	2.7965e-4	-1.2340e-5
SG5	R(Axial)	2.7944e-4	-9.0380e-5
	W(Hoop)	3.1742e-4	-1.1538e-4
	G (45°)	3.7041e-4	-1.2340e-4
SG6	R(Axial)	9.0340e-5	-1.6420e-5
	W(Hoop)	2.4746e-4	-1.6490e-5
	G (45°)	3.3148e-4	-8.9990e-5
SG7	R(Axial)	1.3155e-4	-3.7000e-5
	W(Hoop)	1.4788e-4	-8.2100e-6
	G (45°)	1.6025e-4	-1.0681e-4
SG8	R(Axial)	7.7870e-5	-6.9670e-5
	W(Hoop)	3.2533e-4	-1.2350e-5
	G (45°)	3.8189e-4	-3.2830e-5
SG9	R(Axial)	1.1081e-4	-4.5140e-5
	W(Hoop)	2.7554e-4	-1.2330e-5
	G (45°)	3.5726e-4	-1.1492e-4
SG10	R(Axial)	9.5450e-5	-5.8100e-5
	W(Hoop)	2.6729e-4	-2.0550e-5
	G (45°)	9.0380e-5	-1.2320e-5

Table. 3.3.5 Elbow 및 Tee의 Von-Mises Stress

Description	Location	Max. Von-Mises Stress (MPa)
SG1	Elbow (Upper)	99.7196
SG2		119.9538
SG3		90.8980
SG4	Elbow (Under)	170.1712
SG5		116.1729
SG6		93.7697
SG7	Tee	78.7682
SG8		63.5731
SG9		87.0807
SG10		62.3188

2) Grooved Joint와 압착식 조인트를 적용한 파이프라인의 내진성능평가 결과 비교

- 본 연구에서 수행한 Grooved Joint가 적용된 파이프라인의 내진성능 평가 결과와 선행연구에서 분석한 부산대학교 지진방재연구센터에서 수행한 압착식 조인트가 적용된 파이프라인의 내진성능 평가 결과를 비교함.
- 압착식 조인트의 경우 Flexible Coupling을 대체하기 위해 개발된 조인트로써 Grooved Joint의 실험결과와 비교하여 그 적용성을 검토함.

- 두 개의 조인트 모두 관경이 114.3mm로 동일하며, 또한 재료는 SUS304로 동일함.
- 두 개의 시험체 모두 실제 사용조건을 고려하기 위해 2MPa의 수압을 적용하였으며 건축구조 기준(KBC2016)의 최대 허용 층간변위 0.02h(±60mm)의 정현파를 적용함.
- 취약요소로 판단되는 Upper Elbow와 Under Elbow의 Von-mises응력을 비교하였으며 ASME의 응력조건과 비교함.
- ASME Section II, Part D에서 배관의 허용응력을 다음 식 (3.3.1)와 같이 제시하고 있음.

$$S_m = 2/3S_y \text{ or } S_m = 1/4S_t \quad (3.3.1)$$

여기서, S_m : 허용응력

S_y : 재료의 항복응력

S_t : 재료의 인장강도

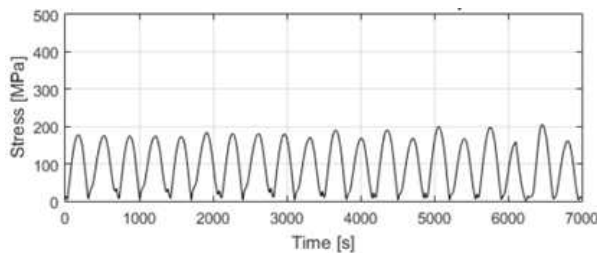
- ASME Section III, Division I에서 제시하고 있는 원자력발전소의 Class 1 배관에 대한 응력 기준은 다음 식 (3.3.2)와 같이 제시하고 있음.

$$B_1 \frac{P_D D_O}{2t} + B_2 \frac{D_O}{2I} M_E \leq 3S_m \quad (3.3.2)$$

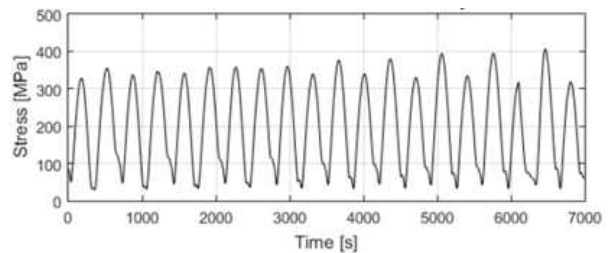
여기서, B_1, B_2 : 주응력지수

M_E : 자중효과를 고려한 발생 모멘트

- SUS 304의 최소 항복응력은 205MPa로 허용응력 S_m 은 137MPa이며 내진성능평가 시 예측된 Von-Mises 응력이 $3S_m$ 인 410MPa 보다 작으면 지진에 안전할 것으로 판단함.
- Fig. 3.3.14는 압착식 조인트의 응력-시간이력이며 Fig 3.3.15는 Grooved 조인트의 응력-시간이력임.
- Table. 3.3.6은 압착식 및 Grooved 조인트의 Upper 및 Under Elbow에서 예측된 최대 Von-Mises응력을 비교하였으며 ASME 기준의 허용응력과 비교함.

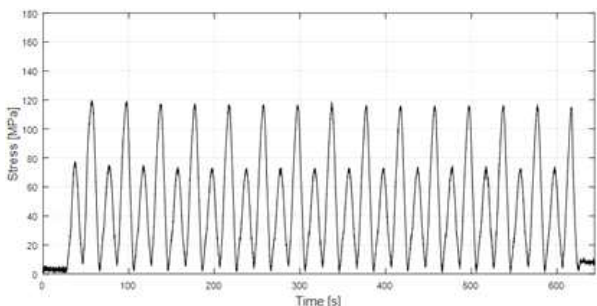


(a) Under Elbow

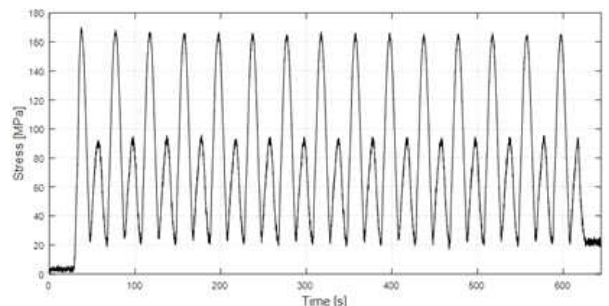


(b) Upper Elbow

Fig. 3.3.14 압착식 조인트가 적용된 파이프라인의 응력-시간이력



(a) Under Elbow



(b) Upper Elbow

Fig. 3.3.15 Grooved 조인트가 적용된 파이프라인의 응력이력

Table. 3.3.6 내진성능평가 결과 비교

	위치	최대 Von-Mises 응력 (S, MPa)	3Sm(MPa)	S/3Sm
압착식 조인트	Upper Elbow	205.3	410	0.50
	Under Elbow	406.7		0.99
Grooved 조인트	Upper Elbow	120.0		0.29
	Under Elbow	170.1		0.41

다. 파이프라인 취약 요소(Elbow, Tee, Valve 등)에 대한 보수/보강 기법

1) 파이프라인의 취약 요소 및 보강 공법의 유형

- 파이프라인의 내진 보강 기법은 크게 Bracing을 이용한 파이프라인 시스템에 대한 내진 보강, Joint에 대한 내진 보강, 고정부에 대한 내진 보강으로 나눌 수 있음.
- 파이프라인 시스템에 대한 내진 보강은 Bracing을 이용하여 지진에 의한 수평 및 수직 하중에 저항할 수 있도록 보강하는 기법.
- 미국의 NFPA13에 따르면 횡방향 최대 12m, 주요 파이프라인 끝단부에서 1.8m 이내에 설치하는 것으로 권고하고 있으며 종방향의 경우 최대 12.2m 간격, 끝단부에서 2.2m 이내에 설치하는 것으로 권고.
- NFPA13에서는 Bracing 보강 시 다음과 같은 사항을 만족하도록 권고.
 - 구요요소는 반드시 지진하중을 견딜 수 있어야 함.
 - Bracing은 수직면에서 최소 30° 이상의 각도로 설치되어야 함.
 - 횡 Bracing은 인장력과 압축력 모두를 견딜 수 있어야 함.
 - 인장만 받는 Bracing을 사용할 수 있지만 대칭적으로 적절히 구속되어야 함.
 - 서로 다른 방향으로 움직일 것으로 예상되는 파이프 일부에는 유연성이 확보되도록 구조를 변경해야 함.
 - 특히 파이프라인이 거물을 가로지르는 경우에는 아래 Fig. 3.3.16과 같은 지진 분리 조립체를 사용해야 함.

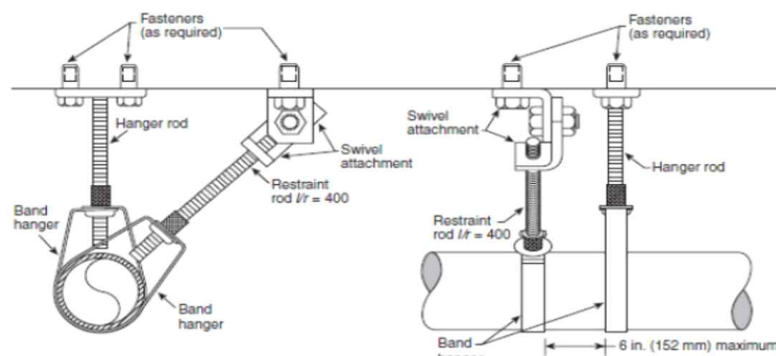


Fig. 3.3.16 수직 및 수평 부재를 이용한 Bracing 보강

- 파이프라인의 연결부에 대한 내진 보강 기법은 연결부에 지진분리이음을 적용하여 시스템의 유연성 확보를 통해 내진 성능을 확보.
- 지진분리이음은 아래 Fig. 3.3.17와 같이 파이프라인의 차등 거동을 이용하여 지진 발생 시 진도에 의한 구조물 또는 비구조물의 파손을 감소시키는 이음.
- 일반적으로 그루브형 커플링과 같이 신축이음쇠가 해당되면 배관의 일정량의 축방향 변위, 회전, 각 변위를 허용하는 부속품.

- 중안소방본부에서 발행한 소방시설의 내진 설계 화재 안전기준 해설서에서 지진분리장치란 지진분리이음으로 연결된 건물에서 상대적으로 움직이는 변위를 최소화하고 예상되는 배관의 움직임을 충분히 수용하여 배관의 파손을 방지하기 위해 사용하는 장치라고 정의.

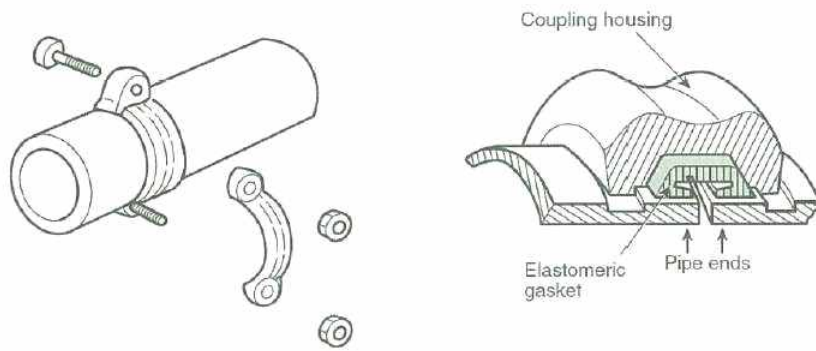


Fig. 3.3.17 지진분리이음 예시

- NFPA 13의 A.9.3.2.3.2.(2)의 규정에서 수계소화설비 입상관의 경우 305mm 이내, 천정에서 610mm 이내에 지진분리이음을 적용하도록 권고.

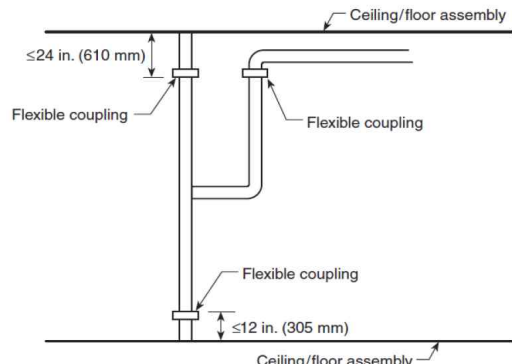


Fig. 3.3.18 NFPA 13의 A.9.3.2.3.2.(2)

- 파이프라인 앵커부에 대한 내진 보강은 Bracing 보강 기법과 함께 적용하여 지진 발생 시 파이프라인의 수평거동에 대하여 효과적으로 유연성을 확보하는 일반적인 방법.
- 일반적으로 후설치 앵커 시스템을 적용하거나 클램프 형태를 적용하여 기존의 부재에 연결되어 고정부를 확보하는 방법.
- 또한 아래 Fig. 3.3.19과 같이 내진 스프링 행어 및 내진 인서트와 같이 앵커가 직접적으로 댐핑 역할을 할 수 있는 시스템을 이루고 상화좌우의 거동이 가능한 보강 방법이 존재.

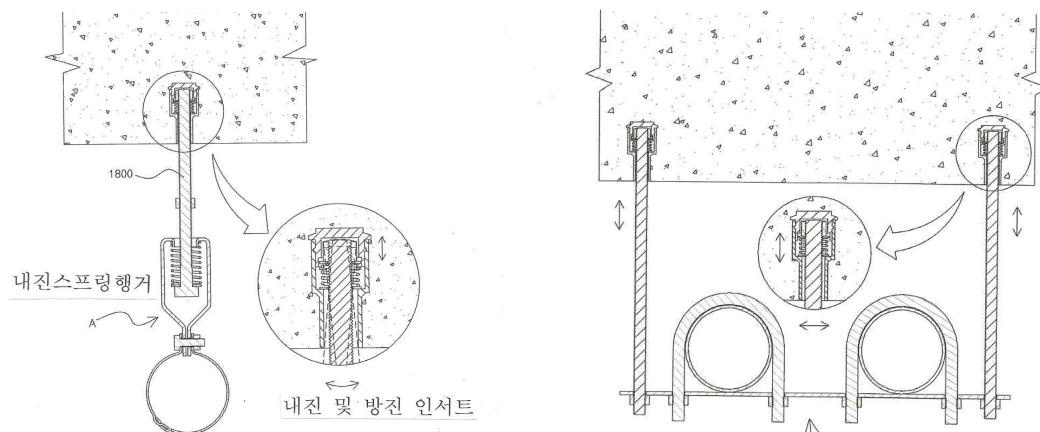


Fig. 3.3.19 내진 스프링 해거 및 내진 인서트

2) 국내외 보수/보강 공법

a) 국내 보수/보강 공법

- 연결부의 보강 공법은 중에는 일반적으로 Joint 혹은 연결부 전체에 보강을 실시하여 연결부의 전체적인 강성을 증가시키는 방법이 사용.
- 기존 배관의 노후화 등으로 인해 비정상적인 거동으로 파손이 될 위험성이 크기 때문에 Joint 혹은 연결부 전체에 재료적 보강을 실시하는 것으로 Fig. 3.3.20에 예시를 정리하여 나타냄.
- 보수 보강의 장점은 물리강도 및 내화학성 등의 재료적 성질의 향상시킴으로써 충격 등의 물리적 반응과 화학적 반응을 저감시킬 수 있음.
- 대부분 빌봉형 구조로써 배관 연결부의 틈으로 침투 경화되어 누수 발생의 위험을 저감시킬 수 있음.

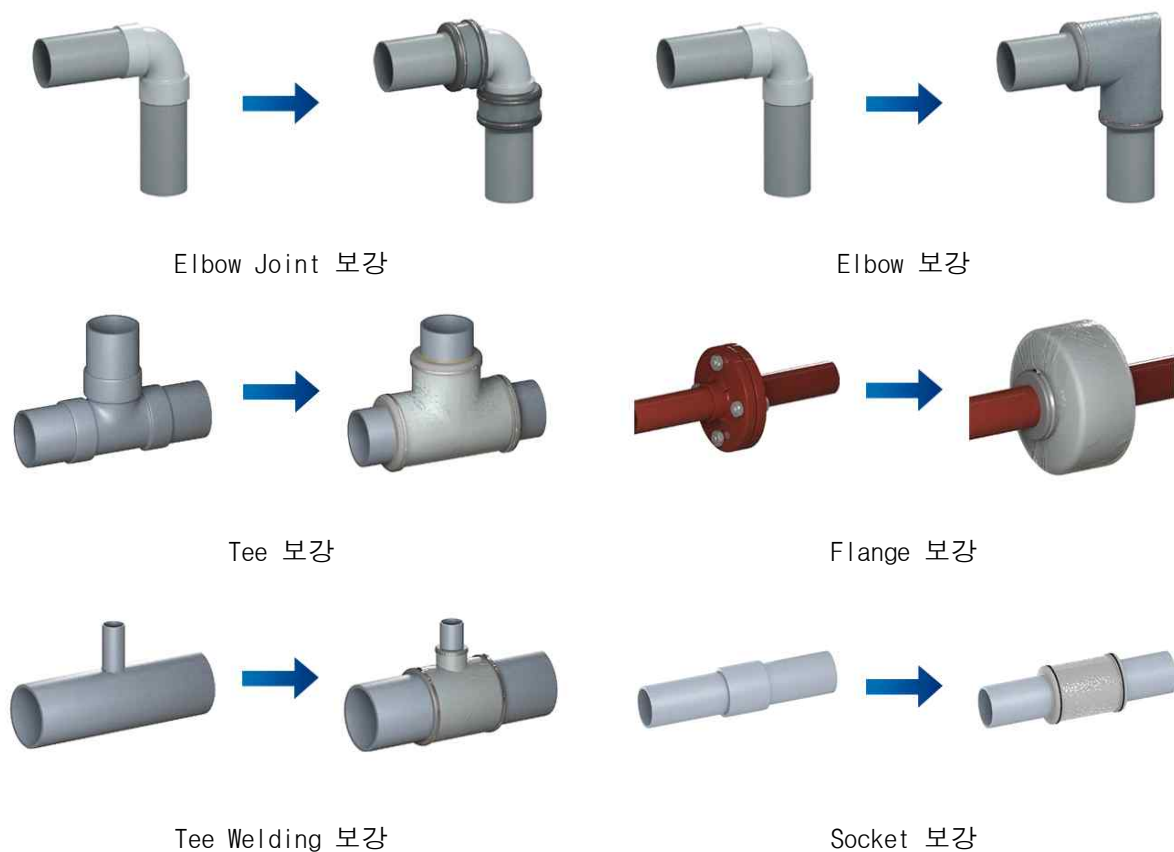


Fig. 3.3.20 배관 연결부의 재료적 보강

- 배관의 연결부의 수밀성을 향상시키고 체결상태를 견고히 유지할 수 있도록 배관용 Joint의 보강구조를 적용하여 Fig. 3.3.21 및 Fig. 3.3.22와 같이 보수/보강할 수 있음.
- Joint 외면을 압착할 수 있는 나사를 적용하여 압착링에 의한 체결과 더불어 보강나사가 파이프를 2차적으로 체결.
- 이러한 보강법은 압착링과 파이프 보강나사가 압력을 분산하여 부담하기 때문에 더욱 높은 압력에도 견딜 수 있으며 부싱 내경이 파이프의 외경보다 크기 때문에 파이프의 거동 및 강성 저하를 감소할 수 있음.

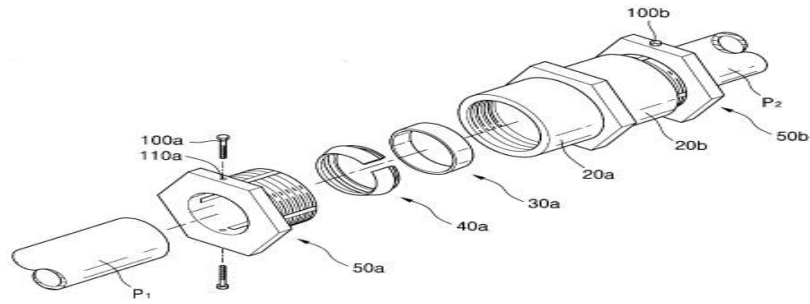


Fig. 3.3.21 배관용 Joint의 보강구조 분해도

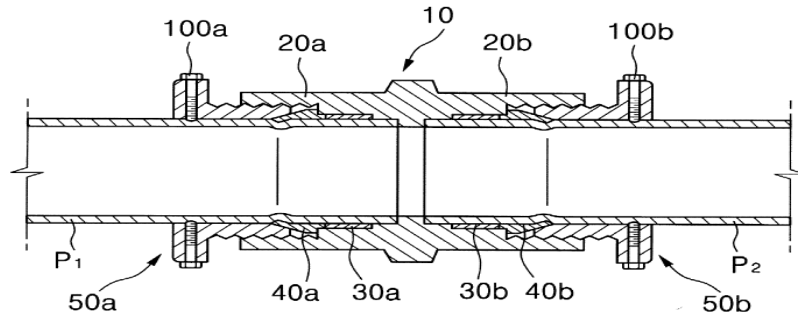


Fig. 3.3.22 배관용 Joint의 보강구조 결합 단면도

- 파이프라인의 고정부에 대한 보수/보강 공법은 일반적으로 고정부에 흔들림 방지 버팀대를 적용.
- 흔들림 방지 버팀대는 지진이나 반복 하중에 의한 진동 발생 시 파이프라인을 고정하고 하중을 분산시켜 파이프라인을 보호하는 목적으로 설치되며 횡방향, 종방향, 4방향 버팀대로 구분할 수 있음.
- 미국의 경우 흔들림 방지 버팀대에 대한 규격 및 내진성능 기준을 마련하고 관련 연구가 활발히 진행되고 있는 반면 국내에서는 관련 기준 및 연구가 미비한 실정.



(a) 입상배관 4방향 버팀대



(b) 수평배관 4방향 버팀대



(c) 종방향 버팀대

Fig. 3.3.23 흔들림 방지 버팀대

b) 국외 보수/보강 공법

- 노즐은 용기 측면의 구멍을 절단하고 적절한 크기의 파이프를 용접하여 노즐을 형성하여 압력 용기 측면에 설치되는데 이러한 교차점은 응력집중 현상이 발생할 수 있어 취약.
- 중요도가 높은 시스템일수록 이러한 약점을 보완하기 위해 보강 패드로 용접하여 배관 분기 연결 또는 압력 용기 노즐을 강화하는데 이러한 방법을 Reinforced Branch Connection Set-on Type이라 함.

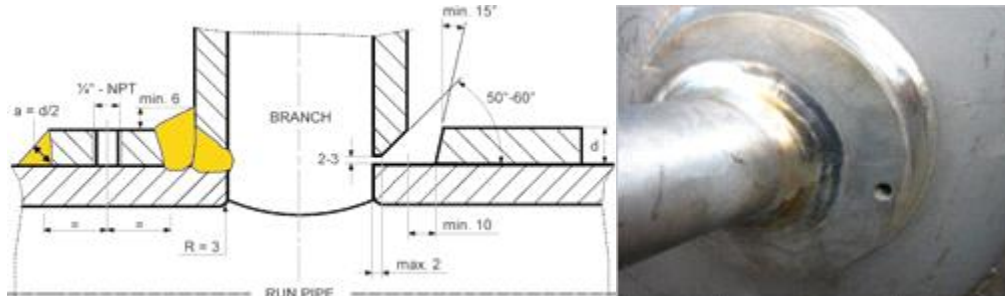
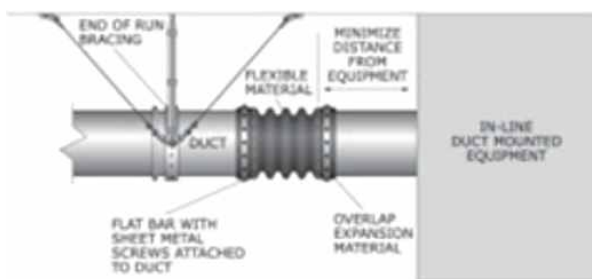
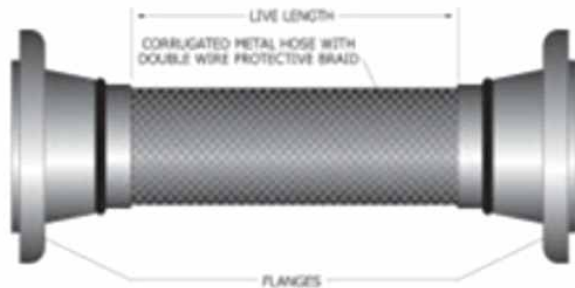


Fig. 3.3.24 Reinforced Branch Connection Set-On Type

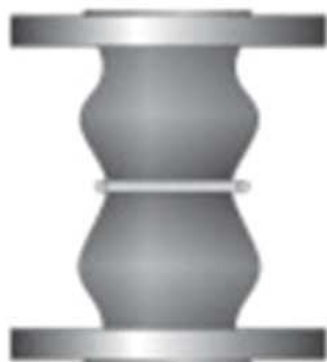
- 지진 발생 시 진동의 영향을 줄이기 위해 Flexible Connection을 적용하게 되는데 이는 배관과 배관을 연결에 유연성을 향상시켜 배관시스템의 전체적인 변위를 감소시키는 역할을 함.
- 일반적으로 사용되는 Flexible Connection은 Rubber Joint Duct Connector, Bracing Hose Pipe Connector, Rubber Hose Pipe Connector, Rubber Hose Connector with Control Rods가 있으며 Fig. 3.3.25에 대표적인 이미지를 정리함.



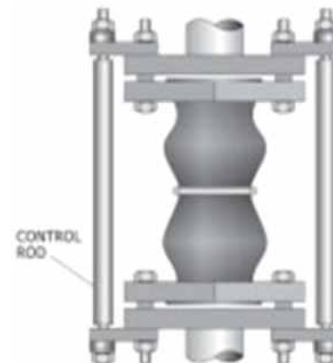
(a) Rubber Joint Duct Connector



(b) Braided Hose Pipe Connector



(c) Rubber Hose Pipe Connector

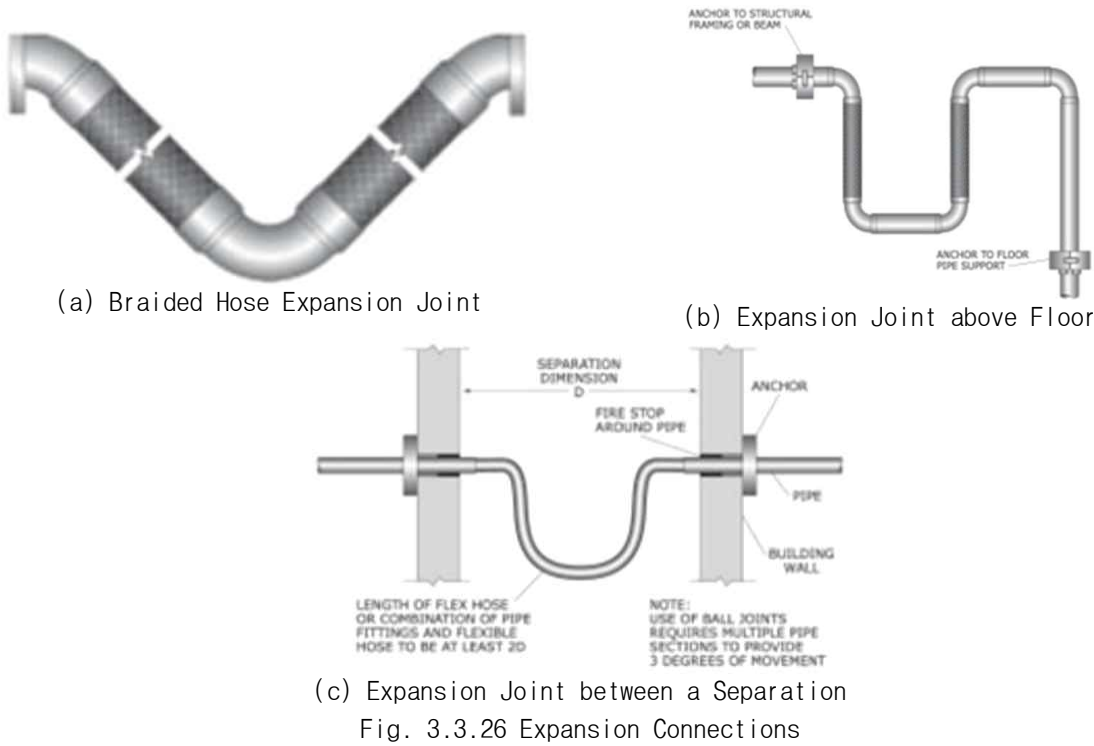


(d) Rubber Hose Connector with Control Rods

Fig. 3.3.25 Flexible Connections

- Expansion Connections은 배관 시스템 또는 배관이 두 개의 다른 건물 구조에 걸쳐 있거나 격리된 건물에 설치될 때 필요.
- 일반적으로 가장 많이 사용되는 Expansion Connections은 Braided Hose Expansion Joint,

Expansion Joint above Floor, Expansion Joint between a Separation등이 있으며 Fig. 3.3.26에 대표적인 이미지를 정리함.



제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표 치	달성 치	측정방 법	검증방 법	기준 치	
주관	1	한국형 파이프라인 내진해석기반 유한요소(Finite Element) 모델 구축	1-1	선행연구 및 데이터 분석	① 선행 연구 및 데이터 자료	5건	5건	건수	보고서	5	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 2건 사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건 학술대회: <u> </u> 1건
			1-2	비선형 유한요소 모델 구축	① 비선형 유한요소 모델	3건	3건	분석결과	보고서	10	
			1-3	Fluid-Structure Interaction 모델	① 상호 작용 모델	3건	3건	분석결과	보고서	10	
주관	2	내진 취약도 및 안전성 평가	2-1	지진시나리오 구축 및 Hazard 분석	① 지진시나리오 모델	1건	1건	분석결과	보고서	5	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 3건 사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건 학술대회: <u> </u> 1건 인력양성: <u> </u> 1건
			2-2	각요소를 고려한 상호연계성에 의한 내진 취약도	① 각 요소의 손상에 의한 내진 취약도	4건	4건	분석결과	보고서	10	
			2-3	Bayesian Approach에 의한 안전성 평가	① Bayesian Approach에 의한 지진 취약도	4건	4건	분석결과	보고서	10	
공동	3	한국형 파이프라인 내진해석기반 유한요소(Finite Element) 모델 구축	3-1	각 요소의 실험적 연구	① 파이프라인 거동 예측 실험	3건	3건	분석결과	보고서	10	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 1건 학술대회: <u> </u> 1건 인력양성: <u> </u> 건
			3-2	실험적 평가에 의한 해석적 모델 구축	① 유한요소모델 구축	3건	3건	분석결과	보고서	10	
			3-3	내진 거동예측을 위한 통계학적 분석	① 데이터 통계 분석	3건	5건	분석결과	보고서	5	
공동	4	내진 취약도 및 안전성 평가	4-1	파이프라인 동적 해석	동적해석	2건	2건	분석결과	보고서	10	특허: 출원 <u> </u> 2건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건 학술대회: <u> </u> 2건 인력양성: <u> </u> 건
			4-2	파이프라인 손상에 의한 보수/보강	보수/보강	3건	3건	분석결과	보고서	10	
			4-3	취약도 신뢰도 개선을 위한 랜덤변수 분석	랜덤변수 분석	3건	3건	분석결과	보고서	5	
계										100	특허: 출원 <u> </u> 2건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 5건 사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 1건 학술대회: <u> </u> 5건 인력양성: <u> </u> 1건

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	2건	100	최소성과목표 초과달성
	비SCI			
	계	2건	100	최소성과목표 초과달성
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	3건	67	2건 Review 중
	계	3건	67	2건 Review 중
특허 출원	국내	2건	50	최소 성과목표 달성
	국외			
	계	2건	50	최소 성과목표 달성
특허 등록	국내			
	국외			
	계			
인력 양성	석사	2건	100	
	박사			
	계	2건	100	
기술 이전	계약 건수			
	계약액			
	징수액			
국제 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
국내 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비			
	기술요약정보			
	생명자원	생명정보		
		생물자원		
		신 품종		
	소프트웨어		1건	100
	화학물			
기타	시제품			
	성과 홍보			
	일자리 창출			
	학술발표		5건	200 최소성과목표 초과달성

2. 관련 분야 기여도

- 한국형 파이프라인의 각 요소별 상호연계성에 근거한 내진 취약도 분석 기술 및 구조물과 지진파의 불확실성에 근거한 보다 신뢰도 높은 방재시스템 개발 기여
- 주요 시설물의 파이프라인과 같은 비구조요소의 성능기반 및 내진 해석 기반 설계 기준 가이드라인의 검증 및 제시 기여
- 주요 시설물 파이프라인 성능기반 내진 안전성 개선에 의한 필수적인 에너지 시설의 재난 발생 시에 따른 효율적인 분배 및 피해복구 시스템구축 기여에 의한 국민의 심리적인 안정 확보

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 질적연구성과의 경우 연구를 성실히 수행하여 초기에 목표한 성과를 달성하고 있다고 판단되며 이에 대한 증빙은 본 보고서에 누락된사항 없이 모두 포함되어 있다고 사료됨.
 - 양적성과의 경우 대부분 지표에서 최소성과를 달성하거나 초과달성을 하였으나 국내 논문(비SCI) 게재의 경우 현재 2건이 심사중에 있으며 나머지 1건에 대해서도 조속한 시일 내에 논문을 투고하여 게재하고자 함.
-

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 주요 시설물(병원, 학교, 복합시설물 등)의 지진 발생 시 운영능력 향상을 위한 비구조 요소 내진 안전성 증대에 기여할 것으로 판단됨.
 - 국내 자연재해의 증가로 인한 새로운 국가방재 시스템의 구축이 필요함에 따라 이에 대응할 수 있는 미래형 재난 대비 주요 시설물의 파이프라인 내진 취약도 기반 국가 방재 시스템 구축에 기여할 수 있을 것으로 판단됨.
 - 재난 발생 시 국가 주요 시설물의 운영능력 향상과 피해복구를 위한 상호연계성 확보 및 파이프라인과 같은 비구조 요소의 내진 설계 기준 활용에 기여할 수 있을 것으로 판단됨.
-

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

제7장. 연구개발성과의 보안등급

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 연구실 안전점검 및 정밀안전진단 실시

본 연구실은 소속되어 있는 경희대학교에서는 실험실 환경안전관리규정(개정: 2011.07.28.)에 의하여, 연구실 환경안전관리위원회를 구성하고, 실험실 안전관리를 위한 연구실 안전점검 및 정밀안전진단을 실시하고 있음. 첫째, 실험실 위험등급은 3등급(A, B, C)로 구분되어 있으며, 본 연구실의 위험등급은 C등급(이화학 실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터관련 실험실)에 해당됨. 이에 따른, 환경안전 점검체계는 총 3단계(① 1단계: 연구실 책임교수 관리 하 매일 1회의 점검 실시, ② 소속대학 관리 하 년 1회 정기점검 실시, ③ 3단계: 전담부서 관리 하 년 1회 실시)로 구축되어 있음. 둘째, 연구실의 정밀안전진단은 “연구실 안전환경 조성에 관한 법률 제 8조”에 의거하여, 해당연구실은 2년마다 1회 이상 실시한다. 한편, 경희대학교에서는 환경안전홈페이지를 구축하여, 기구 및 구성, 환경안전관리, 실험실 환경안전교육, 비정기 환경안전교육 등의 자료를 공유하고 있음.

○ 참여연구원의 교육훈련 및 건강검진 실시

본 연구실에 소속되어 있는 경희대학교는 참여연구원의 교육훈련 및 건강검진을 실시하고 있음. 첫째, 연구실 종사자 및 관계자 전원(석사·박사과정 신입생 및 교육 이수 후 2년이 경과된 보수교육 대상자)을 대상으로, 안전의식을 고취 및 안전을 확보하기 위하여 참여연구원의 교육훈련(실험실 환경안전 의무교육)을 실시하고 있음. 본 의무교육은 총 9 과목(① 실험실 환경안전관리, ② 전기안전, ③ 소방안전, 개인보호구, 안전표지, ④ 응급처치요령, ⑤ 화학약품의 안전관리, 실험시약, 폐수 및 폐액관리, ⑥ 가스안전, ⑦ 실험장비 및 기구의 안전, ⑧ 생물학 실험실 및 동물실험실 안전, ⑨ 방사선 안전관리)을 이수하는 것으로 구성되어 있으며, 이를 완료할 경우, 경희대학교 실험실환경안전관리위원장 명의의 이수증을 부여하고 있음. 둘째, 참여연구원의 건강검진은 유해인자 또는 유해인자로 어느 정도 인정되는 물질에 노출되는 연구자를 대상으로 연구실 안전환경 조성에 관한 법률에 의해 의무적으로 실시하고 있음. 또한, 경희대학교는 연구원의 각종 안전사고에 대비하기 위하여 학생 상해보험 규정을 준수하고 있음.

○ 연구실안전 확보 계획

본 연구실은 위험등급이 C등급으로서, 상대적으로 안전사고의 위험성이 적은 편이지만, 컴퓨터와 냉·난방기기 사용에 따른 전기안전사고에 대비할 계획임. 이를 위해, 연구실 책임교수 관리 하에 전기사용에 따른 안전사고에 유의하기 위하여 환경안전설비를 구비하고, 안전관련 각종 법규, 규정 및 지침에 대한 교육·훈련을 실시함.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Seismic Fragility of Steel Piping System based on Pipe Size, Coupling Type, and Wall Thickness	경희대 학교 산학협 력단	1저자	International Journal of Steel Structures	0.734	2018.06.13.	단독	SCI(E)
2	논문	Fragility Assessments of Multi-Story Piping Systems within a Seismically Isolated Low-Rise Building	경희대 학교 산학협 력단	교신	Sustainability	2.075	2018.10.19.	단독	SCI(E)
3	특허	소방호스 파이프 연결부의 내진성능 개선을 위한 파이프 연결장치	(주) 블루와 이즈		대한민국		20181227	단독	

제11장. 기타 사항

해당사항없음.

ABAQUS, Ver 2018, Dassault Systems

Architectural Institute of Korea, Korean Building Code(KBC2016) and Commentary, 2016.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Secition II, Part D, 2015

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Secition III, Division 1, Subsection NB, NB-3656, 2015

Applied Technology Council (ATC-29-2)., 2003, Seismic design, performance, and retrofit of nonstructural components in critical facilities, ATC 29-2 seminar, 23-24.

Bakre, S.V., Jangid, R.S. & Reddy, G.R., 2004, Seismic response of piping system with isolation devices, 13th World Conference on Earthquake Engineering.

Chopra, A.K., 2001, Dynamic of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice-Hall.

Cornell, C.A., 1968, Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, pp. 1583-1606.

Eletric Power Research Institute (EPRI)., 1994, Methodology for developing seismic fragilities, TR-103959.

Frankel, A., 1995, Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States, Seismological Research Letters, Vol. 66, pp. 8021.

Fujita, K., Kimura, T. & Ohe, Y., 2004, Seismic response analysis of piping systems with nonlinear supports using differential algebraic equations, Journal of pressure vessel technology, 126.1, 91-97.

Gutenberg, B. & Richter, C.F., 1956, Magnitude and evergy of earthqaukes, Annali di Geofisica, Vol. 9, n. 1.

Gupta A., Ju, B.S., 2011, Review of existing literature on real-life failures, seismic design guidelines, and experimental tests for piping systems in buildings, Report, Department of Civil, Construction & Environmental Engineering, 30.

Ju, B.S. & Gupta, A., 2015, Seismic fragility of threaded Tee-joint connections in piping systems, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 132-133, pp. 106-118.

Kennedy, R.P., Cornell, C.A., 1980, Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant, *Nuclear Engineering and Design*, 59, pp. 315-338.

Korea Institute of Civil Engineering, 1997, 내진설계기준연구Ⅱ, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2012, Active Fault Map and Seismic Harzard Map, National Fire Agency

Kwag, S. & Gupta, A., 2017, Probabilistic risk assessment framework for structural systems under multiple hazards using Bayesian statistics, *Nuclear Engineering and Design* 315, 20-34

Kwon, Y.M., Ma, Y.W., Cho, S.W. & Yoon, K.B., 2005, Stress Analysis and Residual Life Assessment of T-piece of High Temperature Pipe, *The Korean Society of Safety*, 20, 3.

Lee, C.H. & Grigoriu, M.D., 2012, Bayesian Fragility for Nonstructural Systems, Technical Report MCEER-12-0006

Lee, S.J., Kim, J.W., Kim, S.S., Lee, M.J. & Yang, J.G., 2011, In-plane Bending Moment Capacity of T-Joints in the Circular Hollow Section of New High Strength Steel Subjected to Cyclic Loadings, *Korean Society of Steel Construction*, 23, 2.

National Fire Preteciton Association(NFPA13), Standard for the installation of sprinkler sysem, U. S., 2010.

MARTÍNEZ, G.E. & Hodgson, I.C., 2007, A comparative study of a piping system subjected to earthquake loads using finite element modeling and analysis, *Proceeding of the 2007 Earthquake Engineering Symposium for Young Researchers*.

McGuire, R.K., 1976, NITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR GEOLOGICAL SURVEY, Open-File Report, 76-67.

Reitherman, R., 2009, Nonstructural Earthquake Damage, Consortium of University for Research in Earthquake Engineering.

Ryu, Y. H., Gupta, A., Jung, W. Y. and Ju, B. S., 2015, A reconciliation of experimental and analytical results for piping system, *International journal of steel structure*, 16(4), pp.1043~1055

Sekiazwa. A., Ebihara, M. & Notake, H., 2003, Development of seismic induced fire risk assessment method for a building, *Fire safety science-proceedings of the seventh international symposium*, pp. 309-320.

Soroushian, S., Maragakis, M., Zaghi, A.E., Echevarria, A., Tian, Y. & Filiatrault, A., 2014, Comprehensive analytical seismic fragility of fire sprinkler piping systems, Technical Report MCEER-14-0002.

Soroushian, S., Ryan, K.L., Maragaki, M., Sato, E. & Sasaki, T., 2012, Seismic response of ceiling/sprinkler piping nonstructural systems in NEES TIPS/NEES nonstructural/NIED collaborative tests on a full scale 5-story building, *Structures Congress 2012*, p. 1315-1326.

Soroushian, S., Zaghi, A.E., Wieser, J., Maragakis, E.M., Pekcan, G. & Itani, A., 2011, Seismic analysis of fire sprinkler systems, *Eighth International Conference on Structural Dynamics EURODYN 2011*.

Tadinada, S., Kwag, S. & Gupta, A., 2015, Structural Fragility of Piping Systems using Equivalent Elastic Time-history Simulations under Bayesian Framework, *Transactions, SMiRT-23 Manchester*

Tadinada, S.K. & Gupta, A., 2017, Structural fragility of T-joint connections in large-scale piping systems using equivalent elastic time-history simulations, *Structural Safety* 65, 49-59

William, H.S., George D.B., Sukhvarsh, J., Sanjay, B. & Adam, L.W., 2006, Efficient dynamic structural response modelling of bolted flange piping systems, *International journal of pressure vessels and piping*, 83.10, 767-776.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.