



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

비선형지지구조 저장탱크의 지진거동  
특성과 신뢰도 기반 성능기반 내진설계

Seismic Behavior Characteristics of Spherical  
Storage Tanks Supported by Inelastic Members  
and Performance-Based Seismic Design Based on  
Reliability

蔚山大學校 大學院  
建設環境工學科  
張靜愨

비선형지지구조 저장탱크의 지진거동  
특성과 신뢰도 기반 성능기반내진설계

Seismic Behavior Characteristics of Spherical  
Storage Tanks Supported by Inelastic Members  
and Performance-Based Seismic Design Based on  
Reliability

指導教授 金益賢

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2023年 12月

蔚山大學校 大學院  
建設環境工學科  
張靜愨

張靜愨의 工學碩士 學位論文을 認准함

審査委員 김익현 (印)

審査委員 차수원 (印)

審査委員 신호성 (印)

蔚山대학교 대학원

2023年 12月

# 감사의 글

4년의 대학교 생활과 2년의 대학원 생활이 끝이 났습니다. 6년 동안 학교 생활을 지내오면서 소중한 추억을 만들어주신 분들께 감사의 말을 전하고자 합니다. 먼저 제가 어떤 선택을 하든 아낌없이 지원해주시고 믿어주신, 대학원 진학을 통해 공부를 더 한다고 하니 참으로 기뻐하셨던, 사랑하는 저희 부모님께 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 한없이 부족한 저에게 많은 가르침을 주셨던 김익현 교수님과 선창호 교수님 정말 감사합니다. 앞으로 더 훌륭한 공학자가 되도록 노력하고 정진하겠습니다. 대학교 졸업을 앞두고 방향하던 저를 대학원으로 이끌어 주신 오석영 교수님, 저를 많이 챙겨주시고 가르쳐주셨던 차수원 교수님, 정혁창 교수님 감사합니다. 그리고 연구실 생활을 하면서 항상 솔선수범하고 많은 도움을 주신 민재 오빠, 영후 오빠, 태훈이 오빠 감사합니다. 저와 2년을 함께 달려오면서 고생한 동윤이 오빠, 18학번 동기이자 같은 연구실 식구가 된 준영이, 귀재에게 감사의 말을 전합니다. 그리고 수자원 연구실인 지환이 오빠, 도진이 오빠, 토질방의 정민이, 인철이 오빠, 같이 운동도 다녔던 유정이, 그리고 다른 방 연구실인 경보 오빠, 찬모 오빠, 영광이 오빠 모두 감사합니다. 제가 20살 때 건설환경공학부에 입학해서 처음 만나 지금까지 인연을 함께 해오고 있는, 같이 공부도 하고 운동도 하고 좋은 추억을 만들고, 이제는 눈만 마주쳐도 뭘 얘기하려는지 아는 소중한 나의 친구 가영이, 조금 늦게 만났지만 지금까지 서로 친한 언니동생사이로 지내는 듬직한 보금이언니, 그리고 캡스톤 때 만났던 의모 오빠에게 감사의 말을 전합니다. 건설환경공학부의 후배이자 동아리 후배인 윤서, 석영이, 치언이, 유진이, 현아에게 감사의 말을 전합니다. 제게 도움을 주셨던 모든 분들께 진심으로 감사드리며 평안과 행복이 가득하시길 바랍니다.

2023년 12월  
장 정 민 드림

## 국 문 요 약

# 비선형지지구조 저장탱크의 지진거동 특성과 신뢰도 기반 성능기반 내진설계

울산대학교 대학원  
건설환경공학과  
장 정 민

산업시설은 국가의 경제에 상당한 기여를 하는 중요한 시설일뿐만 아니라 피해 시 화재 및 폭발, 유해물질의 누출로 인한 토양, 수질 및 대기 오염 등 상당한 2차 피해도 유발된다. 석유화학 플랜트에는 여러 기계설비 및 구조물이 서로 연계되어 운전성을 확보한다. 따라서 이들 시설물 중 하나라도 지진 시 파괴가 발생하면 운전성을 확보할 수 없으며, 이는 직간접적으로 국가 경제에 큰 영향을 미친다.

현행 내진설계는 붕괴방지를 목표로 하고 운전성 확보에 미흡하므로 성능기반 내진설계가 필요하다. 따라서 같은 공정에 속한 시설물은 설계지진에 대해 운전성이 확보 되도록 내진성능을 확보하여야 하며, 시설물의 지진거동에 따라 다른 손상수준(내진성능수준)을 부여하는 것이 바람직하다. 성능기반 설계는 현행의 사양기반 설계와 대비되는 설계개념이다. 사양기반 설계는 규정된 설계법 이외의 다른 설계법을 허용하지 않는 데 반해 성능기반 설계는 요구되는 성능을 만족한다는 것이 검증된다면 어떠한 설계법도 허용한다.

이 연구에서는 비선형지지구조를 갖는 구형 저장탱크의 비선형 동적해석을 통해 지진거동 특성을 분석하였다. 비선형 해석기법은 해석적 검증방법 시 적용 가능하고, 분석된 지진거동 특성은 성능기반설계의 대안적 설계방법의 기초자료로 활용된다.

구형(불) 저장탱크는 여러 개의 기둥과 브레이스로 지지되어 브레이스와 기둥의 좌굴 및 항복 등으로 지진 시 복잡한 비선형거동을 보인다. 이 연구에서는 비선형 거동 특성을 통계적으로 분석하고 이에 기반하여 성능기반 내진설계의 새로운 방법을 제시하였다.

# 목 차

감사의 글 .....	i
국문 요약 .....	ii
목 차 .....	iii
표 목 차 .....	iv
그림 및 사진 목차 .....	v
제 1장 서론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 .....	2
제 2장 내진설계 관련 기준 .....	3
2.1 KDS 17 00 00 내진설계 일반 .....	3
2.2 가스시설 및 지상 가스배관 내진설계기준(KGS GC203) .....	9
제 3장 구형 저장탱크의 지진거동 특성 .....	12
3.1 예제 구형 저장탱크 .....	12
3.2 구형 저장탱크의 지진해석 .....	14
3.2.1 탄성 지진 해석 .....	14
3.2.2 푸쉬 오버 해석 .....	15
3.2.3 비선형 동적 해석 .....	35
3.3 구형 저장탱크의 $R-\mu-T$ 관계 분석 .....	39
제 4장 신뢰도 기반의 성능기반 내진설계 제안 .....	46
4.1 성능기반 내진설계 .....	46
4.2 신뢰도 기반의 성능기반 내진설계 .....	47
제 5장 결론 .....	50
참고문헌 .....	51
ABSTRACT .....	52

## 표 목 차

표 2.1 최소 내진성능목표 .....	4
표 2.2 지진구역 .....	4
표 2.3 지진구역계수 (평균재현주기 500년) .....	5
표 2.4 평균재현주기별 위험도계수 .....	5
표 2.5 지반의 분류 .....	5
표 2.6 가속도표준설계응답스펙트럼 전이주기 .....	6
표 2.7 주기영역별 설계스펙트럼가속도 ( $S_d$ ) .....	6
표 2.8 감쇠보정계수 ( $C_D$ ) .....	6
표 2.9 지반증폭계수 .....	7
표 2.10 가속도시간이력 구간선형 포락함수에 대한 지진규모별 지속시간 (단위: 초)	8
표 2.11 내진등급 분류 .....	9
표 2.12 가스시설 내진성능목표 .....	10
표 3.1 저장탱크 제원 .....	13
표 3.2 간략모델과 상세 모델 비교 .....	14
표 3.3 $P(kN)$ - $\Delta(m)$ 특성 .....	16
표 3.4 응답수정계수-변위연성도-주기에 관한 제안식 .....	39
표 3.5 좌굴 하중 차이 .....	41
표 3.6 분석결과 비교 .....	43
표 4.1 성능구간별 한계값 분류표 .....	47

## 그림 및 사진 목차

### 그림

그림 1.1 붕괴방지수준 내진설계법 .....	2
그림 1.2 성능기반 내진설계법 .....	2
그림 2.1 가속도표준설계응답스펙트럼 (암반지반) .....	6
그림 2.2 가속도표준설계응답스펙트럼 (토사지반) .....	7
그림 2.3 가속도시간이력의 구간선형 포락함수 .....	8
그림 3.1 구형 저장탱크 모델링 .....	13
그림 3.2 재현주기 1000년 S2 지반 설계응답스펙트럼 .....	14
그림 3.3 간략 모델 .....	15
그림 3.4 기둥의 비선형 모델 .....	16
그림 3.5 브레이싱의 비선형 모델 .....	16
그림 3.6 $P(kN)$ - $\Delta(m)$ 그래프 .....	16
그림 3.7 브레이스가 없는 구형 저장탱크 .....	17
그림 3.8 힘-변위곡선 (기둥 1번) .....	18
그림 3.9 힘-변위곡선 (기둥 2번) .....	19
그림 3.10 힘-변위곡선 (기둥 3번) .....	20
그림 3.11 힘-변위곡선 (기둥 4번) .....	21
그림 3.12 힘-변위곡선 (기둥 5번) .....	22
그림 3.13 힘-변위곡선 (기둥 6번) .....	23
그림 3.14 힘-변위곡선 (기둥 7번) .....	24
그림 3.15 힘-변위곡선 (기둥 8번) .....	25
그림 3.16 브레이스가 있는 구형 저장탱크 .....	26
그림 3.17 힘-변위곡선 (기둥 1번) .....	26
그림 3.18 힘-변위곡선 (기둥 2번) .....	28
그림 3.19 힘-변위곡선 (기둥 3번) .....	29
그림 3.20 힘-변위곡선 (기둥 4번) .....	30
그림 3.21 힘-변위곡선 (기둥 5번) .....	31
그림 3.22 힘-변위곡선 (기둥 6번) .....	32
그림 3.23 힘-변위곡선 (기둥 7번) .....	33
그림 3.24 힘-변위곡선 (기둥 8번) .....	34
그림 3.25 인공합성지진과 부합성 검토 .....	35
그림 3.26 입력 인공지진과 .....	35
그림 3.27 브레이스의 $p$ - $\Delta$ 그래프 .....	36

그림 3.28	기둥, 브레이스의 p- $\Delta$ 의 비교 그래프 .....	36
그림 3.29	입력 인공지진파에 따른 기둥과 브레이스의 시간이력그래프 .....	36
그림 3.30	s2 80% x방향 (브레이스 없음) .....	37
그림 3.31	s2 80% x방향 (브레이스 있음) .....	37
그림 3.32	모델별 기둥의 축력(kN), 전단력(kN), 모멘트(kN·m) 비교 .....	38
그림 3.34	브레이스 없는 구형 저장탱크 $R-\mu$ .....	41
그림 3.35	브레이싱 좌굴 18% .....	41
그림 3.36	브레이싱 좌굴 25% .....	42
그림 3.37	브레이싱 좌굴 40% .....	42
그림 3.38	브레이싱 좌굴 18% .....	42
그림 3.39	CV-R .....	43
그림 3.40	R=1.3의 경우의 분포특성 .....	44
그림 3.41	R=2.3의 경우의 분포특성 .....	44
그림 3.42	R=3.2의 경우의 분포특성 .....	45
그림 3.43	R=3.8의 경우의 분포특성 .....	45
그림 3.44	R=4.5의 경우의 분포특성 .....	45
그림 4.1	성능기반 내진설계 일반 절차 .....	46
그림 4.2	성능구간별 연성도의 분산 정도 .....	48
그림 4.3	$R_{design}$ 결정 순서 .....	49
그림 4.4	비초과확률에 따른 k값 .....	49

## 사진

사진 1.1	지진에 의한 구형 저장탱크 피해사진 .....	1
사진 3.1	구형 저장탱크 .....	12

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

우리나라는 지진에 의한 산업시설의 피해가 발생한 예는 없지만 해외에서는 많은 피해사례가 보고되고 있다(튀르키예 이즈밋지진(1999.08.17, M=7.6), 인도 구자라트지진(2001, M=6.9), 일본 동일본대지진(2011, M=9.0~9.1)). 산업시설은 국가의 경제에 상당한 기여를 하는 중요한 시설일뿐만 아니라 피해 시 화재 및 폭발, 유해물질의 누출로 인한 토양, 수질 및 대기 오염 등 상당한 2차피해도 유발된다. 사진 1.1은 지진으로 발생한 화재로 불타고 있는 일본 정제시설 사진이다. 공장의 특성상 가동이 중단된 뒤 복구하는데 오랜 시간이 소요돼 생산 차질이 불가피하고 산업 전분야에 미칠 타격이 크다. 따라서 지진에 의해서도 시설물의 붕괴가 아닌 손상을 줄여 운전성 확보를 위한 내진설계가 필요하지만 현행 내진설계로 불가하다. 설계지진에 대해 운전성이 확보 되도록 내진성능을 확보하여야 하며, 시설물의 지진거동에 따라 다른 손상수준(내진성능수준)을 부여하는 것이 바람직하다.



사진 1.1 지진에 의한 구형 저장탱크 피해사진

## 1.2 연구 목적

석유화학 플랜트에는 여러 설비 및 구조물이 서로 연계되어 운전성을 확보한다. 석유화학 플랜트의 생산활동은 국가 경제에 큰 영향을 미치므로, 구조적인 안전성 뿐만 아니라 시설의 운전성을 유지하는 것이 매우 중요하다. 그러나 현행 내진설계 기준은 그림 1.1과 같이 주로 붕괴방지를 목표로 시설의 설계요건을 제시하고 있으며, 시설의 운전성을 확보하는 요건을 제시하지 못하고 있다. 현행 붕괴방지 내진설계는 인명피해를 최소화하는 것에 목적을 두고 피해 수준을 예측하는 것이 불명확하다. 시설의 거동특성에 따라, 붕괴방지수준 이외의 내진성능수준에 의해서도 시설의 운전성이 확보될 수 있으므로, 그림 1.2와 같이 다양한 내진성능수준을 적용할 수 있는 내진설계 방법의 제시가 필요하다. 그림 1.2는 변위연성도가 5일 때 3등분하여 성능수준을 부여한 것이다. 설계지진에 대한 시설물의 비선형응답변위는 분산도가 크기 때문에 충분한 연성도가 확보되어야 성능수준이 정의될 수 있다. 이 연구에서는 구형 저장탱크의 비선형거동 특성을 통계적으로 분석하여 신뢰도 기반의 성능기반 내진설계 방법을 새롭게 제시하였다.

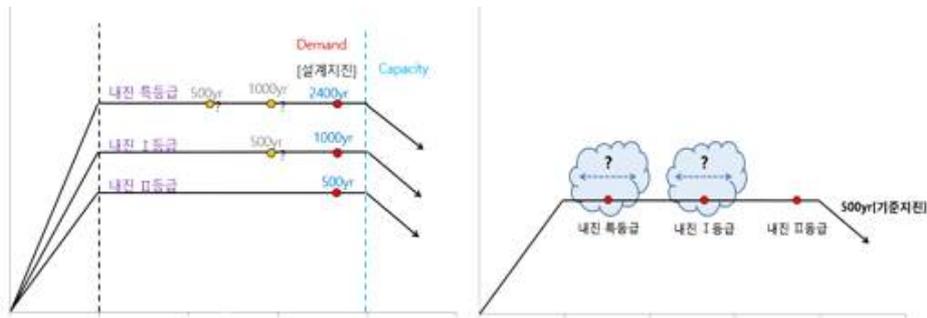


그림 1.1 붕괴방지수준 내진설계법

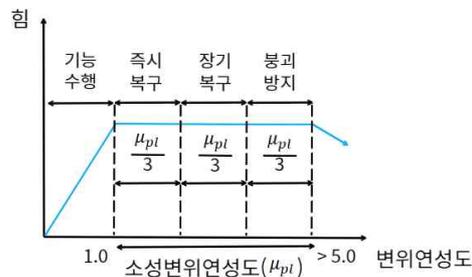


그림 1.2 성능기반 내진설계법

## 제 2장 내진설계 관련 기준

### 2.1 KDS 17 10 00 내진설계 일반

#### 2.1.1 내진성능기준

##### (1) 내진등급

시설물의 내진등급은 중요도에 따라서 내진특등급, 내진 I 등급, 내진 II 등급으로 분류한다. 내진특등급은 지진 시 매우 큰 재난이 발생하거나, 기능이 마비된다면 사회적으로 매우 큰 영향을 줄 수 있는 시설의 등급을 의미한다. 내진 I 등급은 지진 시 큰 재난이 발생하거나, 기능이 마비된다면 사회적으로 큰 영향을 줄 수 있는 시설의 등급을 의미한다. 내진 II 등급은 지진 시 재난이 크지 않거나, 기능이 마비되어도 사회적으로 영향이 크지 않은 시설의 등급을 의미한다.

##### (2) 내진성능수준

시설물의 내진성능수준은 기능수행수준, 즉시복구수준, 장기복구/인명보호수준과 붕괴방지수준으로 분류하며, 시설물의 중요도에 따라 요구되는 내진성능수준을 만족하도록 설계하여야 한다. 기능수행수준은 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 발생한 손상이 경미하여 그 구조물이나 시설물의 기능이 유지될 수 있는 성능수준이다. 즉시복구수준은 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 발생한 손상이 크지 않아단기간 내에 즉시 복구되어 원래의 기능이 회복될 수 있는 성능수준이다. 장기복구/인명보호수준은 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 큰 손상이 발생할 수 있지만 장기간의 복구를 통하여 기능 회복이 가능하거나, 시설물에 상주하는 인원 또는 시설물을 이용하는 인원에 인명손실이 발생하지 않는 성능수준이다. 붕괴방지수준은 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 매우 큰 손상이 발생할 수는 있지만 구조물이나 시설물의 붕괴로 인한 대규모 피해를 방지하고, 인명 피해를 최소화하는 성능수준이다.

##### (3) 설계지반운동 수준

설계지반운동 수준은 다음과 같이 분류한다.

- ① 평균재현주기 50년 지진지반운동 (5년내 초과확률 10%)
- ② 평균재현주기 100년 지진지반운동 (10년내 초과확률 10%)
- ③ 평균재현주기 200년 지진지반운동 (20년내 초과확률 10%)
- ④ 평균재현주기 500년 지진지반운동 (50년내 초과확률 10%)
- ⑤ 평균재현주기 1,000년 지진지반운동 (100년내 초과확률 10%)
- ⑥ 평균재현주기 2,400년 지진지반운동 (250년내 초과확률 10%)

⑦ 평균재현주기 4,800년 지진지반운동 (500년내 초과확률 10%)

(4) 내진성능목표

내진성능목표는 평균재현주기를 갖는 설계지진과 요구되는 내진성능수준의 조합으로 정의한다. 내진등급별로 시설물은 표 2.1에 규정한 최소 내진성능목표를 만족하도록 설계한다. 시설물의 내진등급에 따라 기능수행수준, 즉시복구수준, 장기복구/인명보호수준, 붕괴방지수준 중에서 두 개 이상의 내진성능수준을 선택하여 적용할 수 있다. 시설물별로 보다 강화된 내진성능목표가 필요한 경우에는 표 2.1에 규정된 최소 내진성능목표 이상으로 설계하여야 한다.

표 2.1 최소 내진성능목표

설계 지진		기능수행	즉시복구	장기복구/ 인명보호	붕괴방지
	50년	내진II등급			
100년	내진I등급	내진II등급			
200년	내진특등급	내진I등급	내진II등급		
500년		내진특등급	내진I등급	내진II등급	내진II등급
1000년				내진특등급	내진I등급
2400년					내진특등급
4800년					내진특등급

2.1.2 지반운동

(1) 지진구역 및 지진위험도

지진구역 및 지진구역계수는 표2.2와 표2.3과 같다.

표 2.2 지진구역

지진구역	행정구역	
	I	시
도		경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부 (영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백)
II	도	강원 북부(홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초), 제주

표 2.3 지진구역계수 (평균재현주기 500년)

지진구역	I	II
지진구역계수, Z	0.11	0.07

평균재현주기별 위험도계수  $I$ 는 표2.4와 같다.

표 2.4 평균재현주기별 위험도계수

평균재현주기(년)	50	100	200	500	1,000	2,400	4,800
위험도계수, I	0.40	0.57	0.73	1	1.4	2.0	2.6

(2) 지반의 분류

국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 표 2.5에서와 같이  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ 의 6종으로 분류한다. 다만, 기반암은 전단파속도가 760 m/s 이상인 지층으로 정의한다.

표 2.5 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, H (m)	토층평균전단파속도, $V_{s,soil}$ (m/s)
$S_1$	암반 지반	1 미만	-
$S_2$	얕고 단단한 지반	1~20 이하	260 이상
$S_3$	얕고 연약한 지반		260 미만
$S_4$	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
$S_5$	깊고 연약한 지반		180 미만
$S_6$	부지 고유의 특성평가 및 지반응답해석이 필요한 지반		

(3) 설계지반운동

① 암반지반 설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 다음과 같다. 5% 감쇠비에 대한 수평설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 그림 2.1 및 표 2.6으로 정의되며, 각 주기영역에 대한 설계스펙트럼가속도는 표 2.7과 같다. 감쇠보정계수 ( $C_D$ )는 표 2.8과 같다.

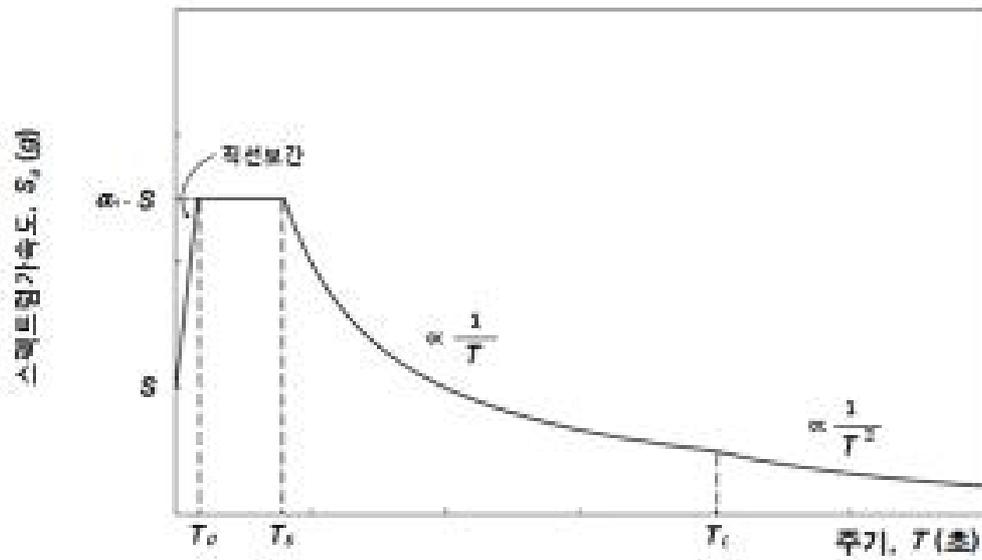


그림 2.1 가속도표준설계응답스펙트럼 (암반지반)

표 2.6 가속도표준설계응답스펙트럼 전이주기

구분	$\alpha_A$ (단주기스펙트럼 증폭계수)	전이주기		
		$T_0$	$T_s$	$T_L$
수평	2.8	0.06	0.3	3

표 2.7 주기영역별 설계스펙트럼가속도 ( $S_a$ )

주기 (T, sec)	$0 \leq T \leq T_0$	$T_0 \leq T \leq T_s$	$T_s \leq T \leq T_L$	$T_L \leq T$
설계스펙트럼 가속도( $S_a$ , g)	$(1+30T) \times S$	$2.8S$	$0.84/T \times S$	$2.52/T^2 \times S$

표 2.8 감쇠보정계수 ( $C_D$ )

주기 (T, sec)	$T=0$	$0 \leq T \leq T_0$	$T_0 \leq T$
$C_D$	모든 감쇠비에 대해서 1.0	$T=0$ 일 때, 1.0 $T=T_0$ 일 때, $(\frac{6.42}{1.42+\epsilon})^{0.48}$ 그 사이는 직선보간	$(\frac{6.42}{1.42+\epsilon})^{0.48}$

② 토사지반 설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 다음과 같다. 5% 감쇠비에 대한 수평설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 그림 2.2로 정의한다. 유효수평지반가속도에 따른 단주기지반증폭계수와 장주기지반증폭계수는 표 2.9를 이용하여 결정한다. 유효수평지반가속도의 값이 중간 값에 해당할 경우 직선보간하여 결정한다. 감쇠비에 따른 스펙트럼 형상은 해당 토사지반에 적합한 가속도시간이력을 이용하여 공학적으로 적절한 분석과정을 통해 결정할 수 있다.

③ 그림 2.1 및 그림 2.2에서 유효수평지반가속도는 지진하중을 산정하기 위한 지반 운동수준으로 국가지진위험지도 또는 행정구역에 따라 결정한다. 다만, 국가지진위험지도를 이용하여 결정하는 경우, 행정구역에 따라 결정한 값의 80% 보다 작지 않아야 한다. 행정구역에 의한 방법으로 평균재현주기에 따른 유효수평지반가속도( $S$ )를 결정할 때는 다음 식(2.1)과 같이 지진구역계수( $Z$ )에 각 평균재현주기의 위험도계수( $I$ )를 곱하여 결정한다.

$$S = Z \times I \tag{2.1}$$

시설물이 설치될 부지의 특성, 시설물의 구조특성과 설계법을 고려하여 작성된 설계응답스펙트럼이 있는 경우 전문가 그룹의 검증을 거쳐 사용할 수 있다.

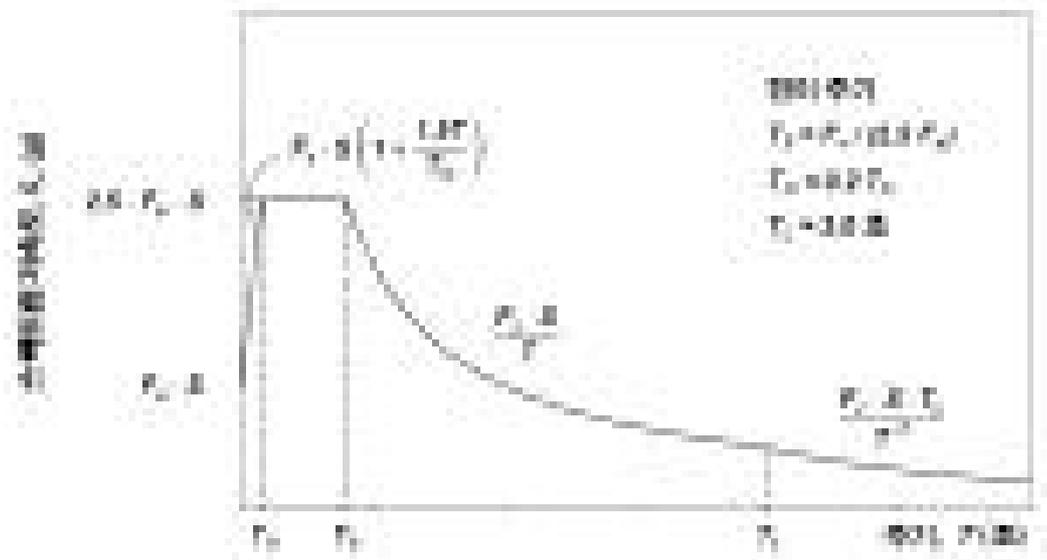


그림 2.2 가속도표준설계응답스펙트럼 (토사지반)

표 2.9 지반증폭계수

지반종류	단주기지반증폭계수, $F_a$			장주기지반증폭계수, $F_v$		
	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
$S_2$	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3
$S_3$	1.7	1.5	1.3	1.7	1.6	1.5
$S_4$	1.6	1.4	1.2	2.2	2.0	1.8
$S_5$	1.8	1.3	1.3	3.0	2.7	2.4

(4) 인공합성 지반운동 시간이력

- ① 지반분류별 표준설계응답스펙트럼에 부합되도록 인공적으로 합성하여 생성한다.
- ② 지반운동의 장주기 성분이 구조물의 거동에 미치는 영향이 중요하다고 판단될 경우에는 지진원의 특성과 국지적인 영향을 고려하여 시간이력을 생성하여야 한다.

- ③ 시간이력의 절단진동수는 최소 50 Hz 이상이어야 한다.
- ④ 인공합성 지반운동의 지속시간은 지진의 규모와 특성, 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이 미치는 영향을 고려하여야 하며, 지진규모에 따른 구간선형 포락함수의 형상과 지속시간은 그림 2.3 및 표 2.10과 같다.
- ⑤ 어떤 두 개의 가속도시간이력 간의 상관계수는 0.16을 초과할 수 없다.

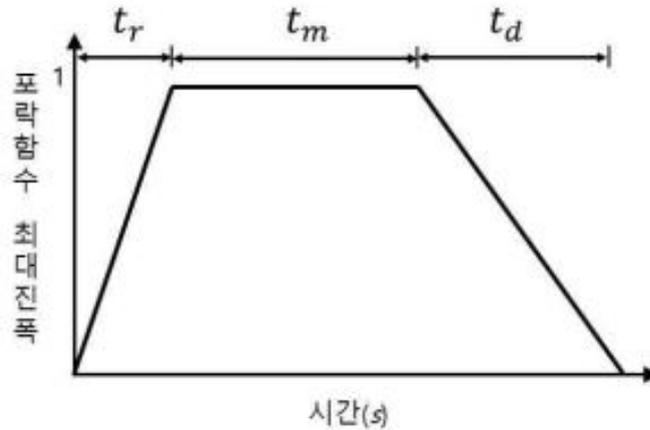


그림 2.3 가속도시간이력의 구간선형 포락함수

표 2.10 가속도시간이력 구간선형 포락함수에 대한 지진규모별 지속시간(단위: 초)

지진규모	상승시간 ( $t_r$ )	강진동지속시간 ( $t_m$ )	하강시간 ( $t_d$ )
7.0 이상-7.5 미만	2	12.5	13.5
6.5 이상-7.0 미만	1.5	9	10.5
6.0 이상-6.5 미만	1	7	9
5.5 이상-6.0 미만	1	5.5	8.0
5.0 이상-5.5 미만	1	5	7.5

(5) 응답이력해석

- ① 응답(시간)이력해석은 널리 알려진 실험 또는 이론으로 검증된 재료 및 부재이력 모델을 사용하여 수행하여야 한다.
- ② 응답(시간)이력해석은 두 개의 직교하는 주축방향(교축 및 교축직각방향)과 하나의 수직방향에 통계학적으로 독립된 입력지반운동이 동시에 작용하는 것으로 하여 해석하여야 한다.
- ③ 해석에 필요한 입력지반운동 시간이력 수는 최소 4세트 이상이어야 한다.
- ④ 4세트의 입력지반운동 시간이력을 사용하는 경우, 각 해석에서 구해진 응답의 최댓값을 최대응답값으로 하고, 7세트 이상의 지반운동 시간이력을 사용하는 경우에는 각 해석에서 구해진 최대응답의 평균값을 최대응답값으로 하여야 한다.

## 2.2 가스시설 및 지상 가스배관 내진설계기준(KGS GC203)

### (1) 내진등급 분류

중요도 등급 및 영향도 등급에 따른 내진등급은 표 2.11과 같이 분류하고, 영향도 등급 A를 적용받는 가스 도매 사업자 시설은 내진등급별로 관리 등급을 부여하여 중점 관리한다.

표 2.11 내진등급 분류

중요도 등급	영향도 등급	관리 등급	내진 등급
특	A	핵심 시설	내진 특 A
	B	-	내진 특
1	A	중요 시설	
	B	-	
2	A	일반 시설	내진 II
	B	-	

### (2) 내진성능수준

내진설계는 내진설계 구조물의 지진 하중 작용 시 기능수행수준 및 붕괴방지수준의 내진성능수준을 만족하도록 설계하고, 내진등급별 요구되는 내진성능수준은 다음과 같다. 표 2.12의 내진 특A등급으로 분류된 내진설계 구조물의 기능수행 수준은 재현주기 200년 지진지반운동, 붕괴방지수준은 재현주기 4800년 지진지반운동의 내진성능수준을 각각 만족하도록 한다.

### (3) 내진성능목표

가스시설의 내진성능 목표는 내진등급별로 설계지반운동에 대한 내진성능 수준으로 정의되며 표 2.12를 따른다. 내진특등급으로 분류된 내진설계 구조물의 기능수행 수준은 재현주기 200년 지진지반운동, 붕괴방지수준은 재현 주기 2400년 지진지반운동의 내진성능수준을 각각 만족하도록 한다. 표 2.12의 내진 I 등급으로 분류된 내진설계 구조물의 기능수행수준은 재현 주기 100년 지진지반운동, 붕괴방지수준은 재현주기 1000년 지진지반운동의 내진성능 수준을 각각 만족하도록 한다. 표 2.12의 내진 II 등급으로 분류된 내진 설계 구조물의 기능 수행 수준은 재현주기 50년 지진지반운동, 붕괴방지수준은 재현주기 500년지진지반운동의 내진성능수준을 각각 만족하도록 한다. 가스시설의 내진성능 목표는 내진등급별로 설계지반운동에 대한 내진성능수준으로 정의되며 표 2.12에 따른다.

표 2.12 가스시설 내진성능목표

	재현주기(년)	내진성능 수준	
		기능수행	붕괴방지
설계지반운동	50	내진Ⅱ등급	
	100	내진Ⅰ등급	
	200	내진 특등급	
		내진 특A등급	
	500		내진Ⅱ등급
	1000		내진Ⅰ등급
	2400		내진 특등급
	4800		내진 특A등급

(4) 설계거동한계

가) 기능수행수준

- ① 저장탱크와 탭류의 구조부재 및 재료는 지진하중 작용 시 탄성한계 내에서 거동하는 것으로 한다.
- ② 지지구조물과 그 구조재료는 국부적으로 극히 경미한 구조적손상 및 선형거동한계의 초과는 허용될수있으나전체적으로탄성거동에준하고, 경미한구조의 손상으로 인해가스시설의 기본적인 기능이 저하되지 아니하는 것으로 한다.
- ③ 저장탱크, 탭류 및 기초와 지지구조물의 연결부는 회복이 불가능한 구조적 손상이발생되지 아니하는 것으로 한다.
- ④ 저장탱크 및 탭류와 다른 시설과의 연결부에는 본래의 기능이 저하되거나 손실될수 있을 정도의 응력이나 변형이 발생하지 아니하는 것으로 한다.
- ⑤ 기초의 변형, 기초와 지지구조물과의 상대변위는 저장탱크, 탭류 및 처리설비의 정상적인 기능수행이 가능한 범위 내로 제한한다.
- ⑥ 지반에는 과도한 변형이 발생하지 아니하도록 하고, 액상화로 인해 내진설계 구조물의 정상적인 기능수행에 지장을 초래하지 아니하는 것으로 한다.

나) 붕괴방지구준

- ① 저장탱크와 탭류의 구조부재와 재료는 지진하중작용 시 탄성한계를 초과하는 소성거동을 허용할 수 있으나 이로 인하여 급작스런 취성파괴나 좌굴이 초래되지 아니하도록 하고, 저장되어 있는 액화가스나 압축가스에 대한 통제가 불가능할 정도로대량 유출되지 아니하는 것으로 한다.
- ② 지지구조물은 소성영역 안에서 거동하는 것은 허용되나, 이로 인하여 저장탱크와탭류의 연결부 및 연결시설이 내용물 유출방지기능을 유지할 수 없는 수준의 과도한 손상과 변형이 발생하지 아니하는 것으로 한다.
- ③ 저장탱크, 탭류 및 기초와 지지구조물의 연결부 처리설비 및 기초와 지지구조물의연결부는 탄성한계를 초과한 거동이 허용될 수 있으나, 이로 인하여 지지구조물의연성능력이 발휘될 수 없는 취성파괴가 유발되지 아니하는 것으로 한다.

- ④ 저장탱크 및 다른 시설물과의 연결부는 그 내부에 저장되어 있는 가스가 통제불가능할 정도로 대량 유출될 수 있는 정도의 구체적 손상이 발생되지 아니하는 것으로 한다.
- ⑤ 기초의 변형 및 기초와 지지구조물과 의상대변 위는 저장탱크, 탐류및처리설비의내용물유출방지 기능을 유지할 수 있는 범위 안에 있도록 한다.
- ⑥ 지반에는 과도한 변형과 침하 또는 전단파괴가 발생하지 않도록 하고, 액상화로 인하여 내진설계 구조물에서 저장물의 유출방지 기능수행에 지장을 초래하지 아니하도록 한다.

(5) 내진설계시 고려사항

- ① 계획된 순서에 따라 구조물의 구조부재가 항복하도록 내진역량설계(Capacity Design)를 한다.
- ② 내진설계 구조물의 연성거동을 보장할 수 있도록 설계한다.
- ③ 내진설계 구조물의 연성거동을 보장할 수 없거나 소성거동을 수용할 수 있는 내진상세를 확보하고 있지 않은 경우에는 응답수정계수를 적용하지 아니한다. 다만, 구조물이 탄성거동 한계를 초과한다면 비선형 응답이력해석을 수행하여 구해진 지진응답을 사용할 수 있다.

(6) 지진해석 방법

내진설계 구조물의 유체-구조물-지반 상호작용을 해석할 때에는 구조물의 유연성과 지반의 변형성을 고려한다. 다만, 유체-구조물의 상호작용이 경미할 경우에는 그 구조물을 강체(剛體)로 모델링할 수 있다.

## 제 3장 구형 저장탱크의 지진거동 특성

### 3.1 예제 구형 저장탱크

사진 3.1은 구형 저장탱크이며 기둥과 브레이스로 지지되어있다. 압력을 쉽게 분산시킬 수 있도록 저장용기는 구 모양으로 되어있다. 보관이 위험하고 압력이 높은 프로판이나 부탄 같은 제품을 저장한다.

구형 저장탱크의 지진거동 특성을 분석하기 위하여 모델탱크를 선정하였다. 모델탱크는 물질을 저장하는 구형 저장용기와 이를 지지하는 8개의 기둥과 안정성 제고를 위하여 X형 브레이스가 설치되어 있다(그림 3.1). 제원특성은 표 3.1과 같다. 일반적으로 저장용량은 탱크의 80% 수준이지만 해석을 간편하게 하기 위하여 저장물질은 550kN/g으로 가득찬 것으로 가정하였다. 저장용기는 셸요소, 기둥은 보요소로 모델링화 하였고 브레이스는 역학적 특성을 고려하여 축력만 받는 트러스 요소로 모델링하여 기둥의 양단에 힌지로 연결하였다. 기둥의 하단의 지지조건은 완전고정으로 하였다.



사진 3.1 구형 저장탱크

표 3.1 저장탱크 제원

구분	제원
직경(m)	11.5
셸 두께(mm)	16.5
기둥 높이(m)	6.05
기둥 단면(mm)	406.4×9.5
브레이스 단면(mm)	114.3×6
기둥간 간격(m)	4.75
$\theta(^{\circ})$	60
$\beta(^{\circ})$	52

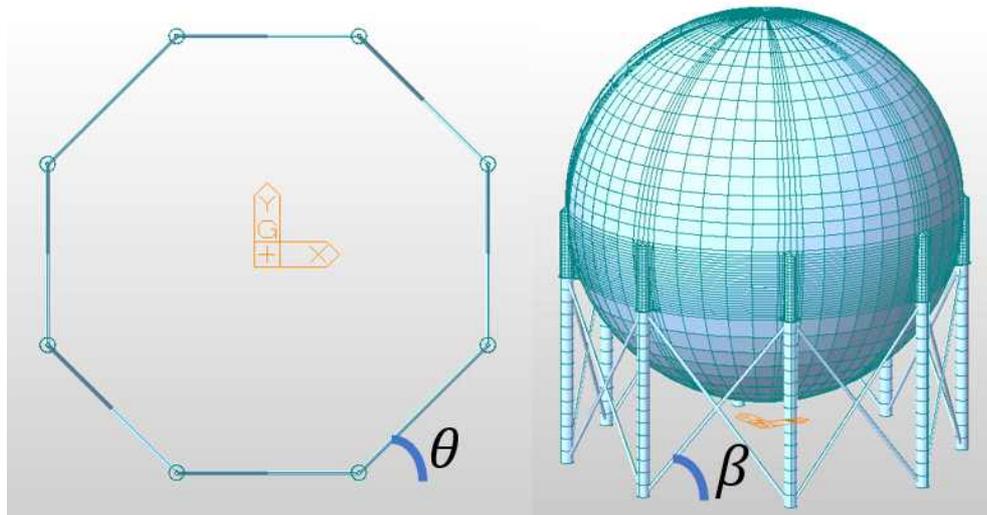


그림 3.1 구형 저장탱크 모델링

## 3.2 구형 저장탱크의 지진해석

### 3.2.1 탄성지진해석

탄성지진해석에는 기본적으로 스펙트럼해석을 적용한다. 모델탱크의 진동주기는 0.4(sec)이며, 설계응답스펙트럼(재현주기 1000년, S2 지반)을 이용하여 탄성지진력 ( $F_{el}=16,280\text{kN}$ )을 산정하였다. 그림 3.2는 재현주기 1000년의 S2지반의 스펙트럼 그래프이다.

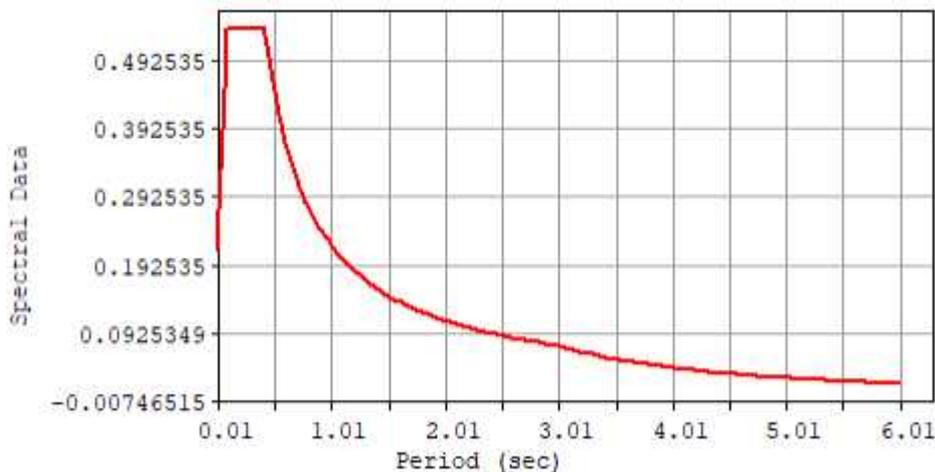


그림 3.2 재현주기 1000년 S2 지반 설계응답스펙트럼

모델탱크 경우 저장물질의 질량이 전체 질량의 88%이며, 저장용기와 저장물질은 지진 시 일체로 거동하므로 질량이 저장용기의 중심에 집중된 1-질점계로 간략하게 모델화할 수도 있다. 이 때 지지부재의 전체강성( $K_s$ )은 기둥( $c$ )의 강성과 브레이싱( $b$ )의 설치각도( $\beta$ ,  $\theta$ )를 고려한 강성의 합으로 식(3.1)으로 할 수 있다. 여기서,  $h_c$ ,  $I_c$ 는 각각 기둥의 높이, 단면2차모멘트,  $A_b$ ,  $L_b$ 는 각각 브레이스의 단면적, 길이이다.

$$K_s = \sum_{j=1}^n \frac{12EI_c}{h_c^3} + \sum_{k=1}^n \frac{EA_b}{L_b} \cos^2\theta \cdot \cos^2\beta \quad \text{식(3.1)}$$

저장용기를 단순 mass로 가정하고 rigid link로 기둥과 연결한 간략 모델(그림 3.3)과 상세모델(그림 3.1)을 비교하면 표 3.2와 같다. 진동주기는 87.8%, 탄성지진력은 99.5%의 유사함을 보였다.

표 3.2 간략모델과 상세 모델 비교

	간략 모델	상세 모델
진동주기 (sec)	0.36	0.41
탄성 지진력 (kN)	16,353	16,276

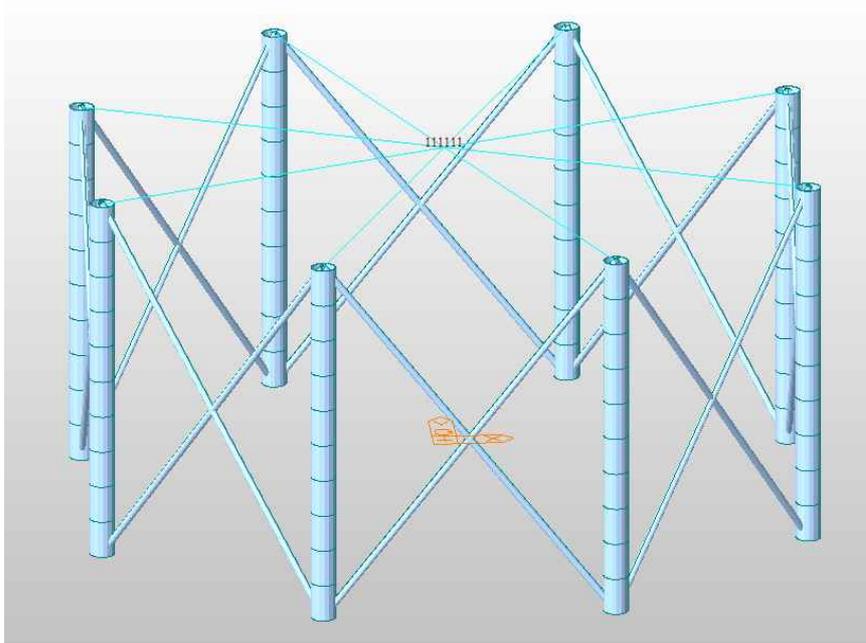


그림 3.3 간략 모델

### 3.2.2 푸쉬오버해석

모델탱크의 항복강도( $F_y$ )와 항복변위( $\Delta_y$ )를 산정하기 위하여 푸쉬오버(push-over) 해석을 하였다. 푸쉬오버 해석은 비선형 정적해석으로 시설물의 질점 위치에 정적 하중을 점진적으로 증가시켜 보유성능(힘-변위 관계식)을 구하는 해석이다. 이 때 시설물의 구조요소는 항복 및 좌굴 등 비선형 거동특성을 모사할 수 있는 역학적 모델을 적용하여야 한다. 대상 모델의 강제기동은 좌굴은 발생하지 않고 항복만 발생하여 그림 3.4와 같이 2선형(bi-linear) 역학모델( $b \approx 0$ )을 적용하였고, 브레이스는 인장을 받는 경우 항복이 발생하고 압축을 받는 경우 좌굴(buckling)이 발생하므로 이를 모사할 수 있는 역학모델을 적용하였다(그림 3.5).

모델탱크의 브레이스의 좌굴강도는 항복강도의 18% 수준이다. 모델탱크에서 브레이스가 탱크의 강도에 기여하는 정도를 확인하기 위하여 브레이싱 없는 경우(Br\_0), 브레이싱이 좌굴없이 항복만 고려하는 경우(Br\_y), 인장브레이스는 항복, 압축브레이스는 좌굴을 고려한 경우(Br\_yb)에 대해 해석을 수행하였다. 해석 결과는 그림 3.6 및 표 3.3과 같다. 브레이스가 없는 모델(Br\_0)의 강도에 대해 실제 모델(Br\_yb)의 강도는 2.6배 증가하여 브레이스가 탱크의 강도 확보에 크게 기여함을 알 수 있다. 한편, 브레이스의 좌굴을 고려하지 않고 항복만 고려하면 실제 강도를 과대평가( $3770/2440=1.55$  배)하게 된다. 브레이싱의 좌굴을 고려하고 재료모델의 항복강도를 변수로 두었다.

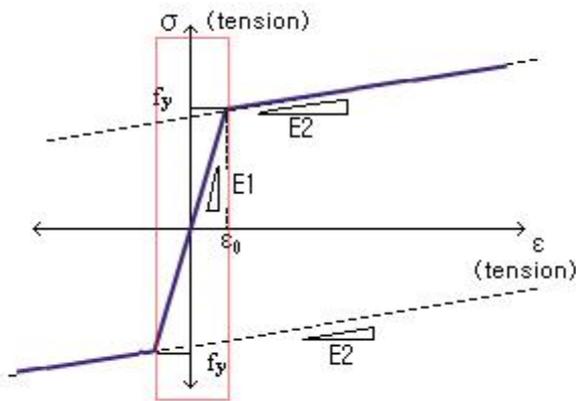


그림 3.4 기둥의 비선형 모델

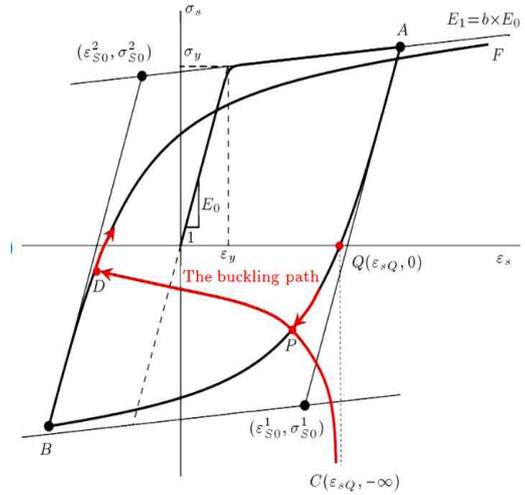


그림 3.5 브레이싱의 비선형 모델

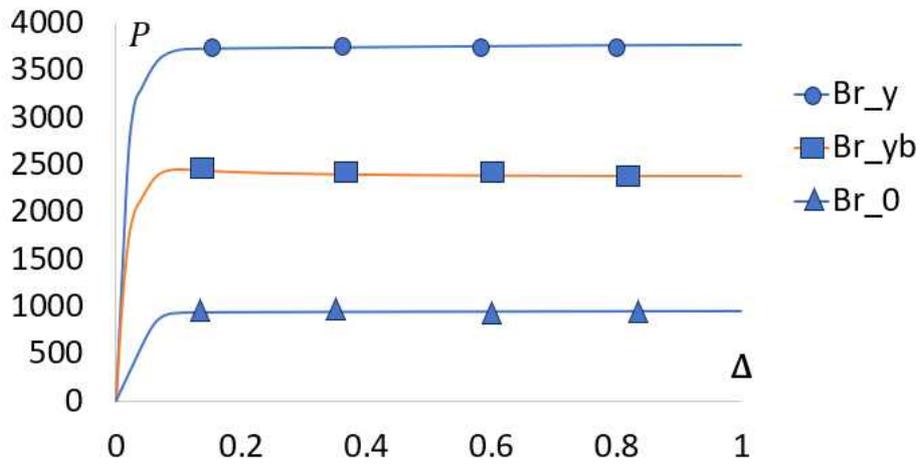


그림 3.6 P(kN)-Δ(m) 그래프

표 3.3 P(kN)-Δ(m) 특성

구분	Br_0	Br_y	Br_yb
T (sec)	1.3	0.4	0.4
F <sub>cl</sub> (kN)	6280	16280	16280
F <sub>y</sub> (kN) (Br_0 대비)	-	(3.9)	(2.6)
Δ <sub>y</sub> (mm) (Br_0 대비)	0.09	(0.3)	(0.2)

브레이스가 없는 저장탱크(그림 3.7)의 경우 푸쉬오버 해석 결과는 다음과 같다. 기둥의 변위는 위에서 봤을 때 왼쪽 상단에서 시계방향으로 매졌다. 기둥의 파이버 단면 요소의 인장축, 압축축 해석결과와 응력-변형률 결과, p- $\Delta$  그래프를 그림 3.8 ~ 그림 3.15 으로 나타내었다. 그림 3.4에서 사각형 영역 안은 Elastic, 그 이외의 영역은 Yielding으로 그림 3.8 ~ 그림 3.15에서 각각 파란색, 노란색으로 나타내었다. 8 개의 기둥 모두 상부 전체 단면이 먼저 항복하였고 개별로 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않았다.

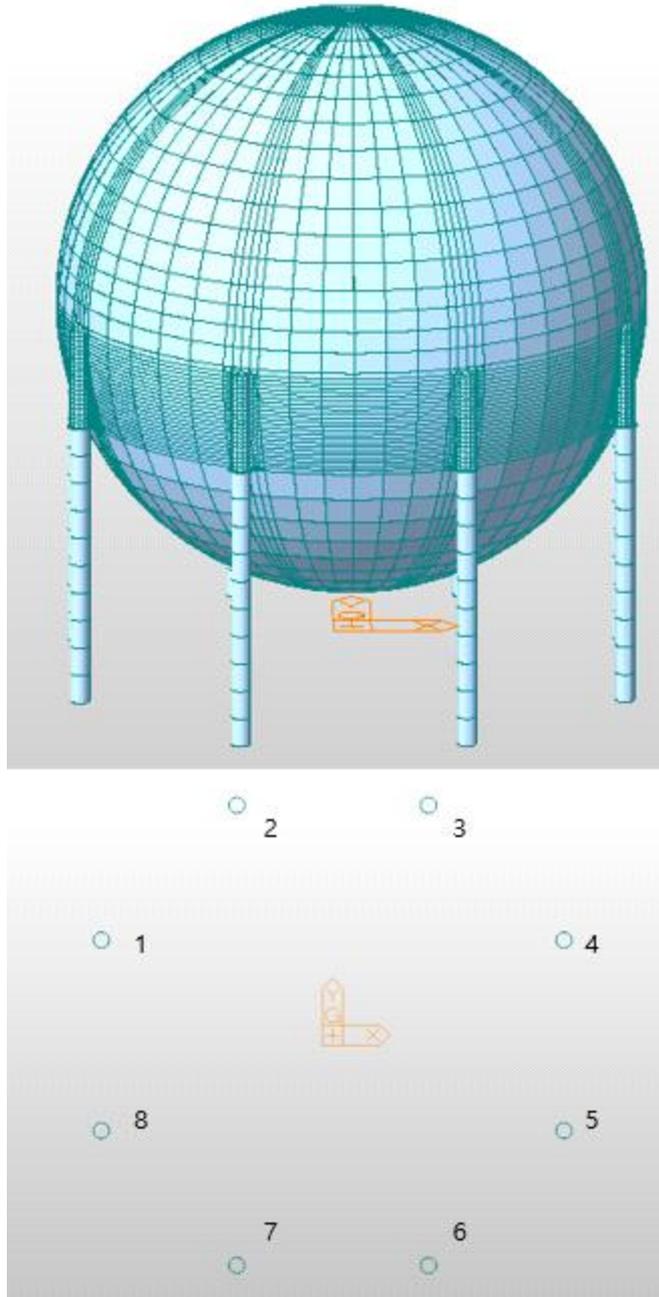


그림 3.7 브레이스가 없는 구형 저장탱크



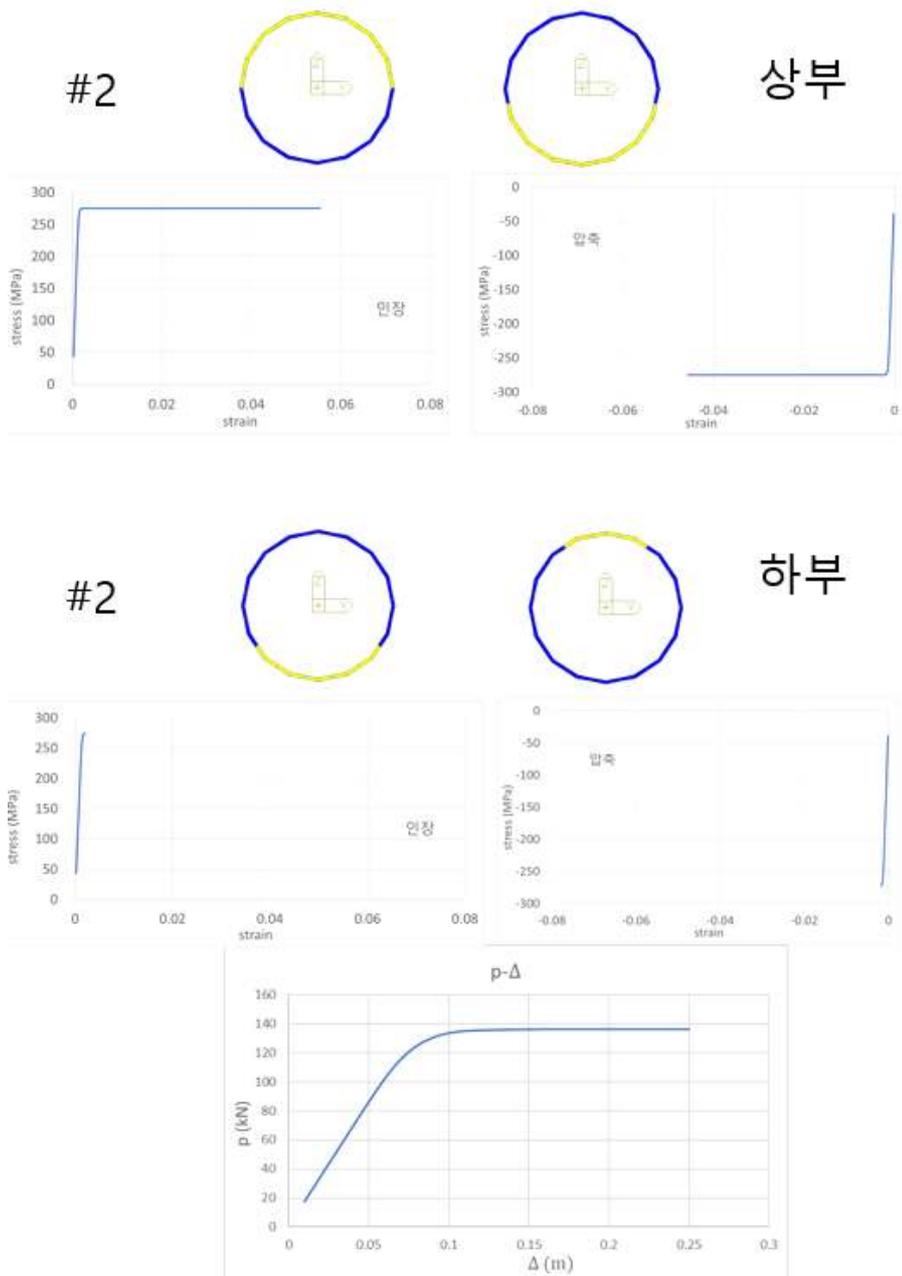


그림 3.9 힘-변위곡선 (기둥 2번)

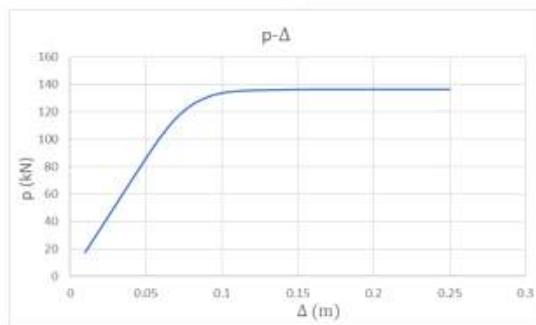
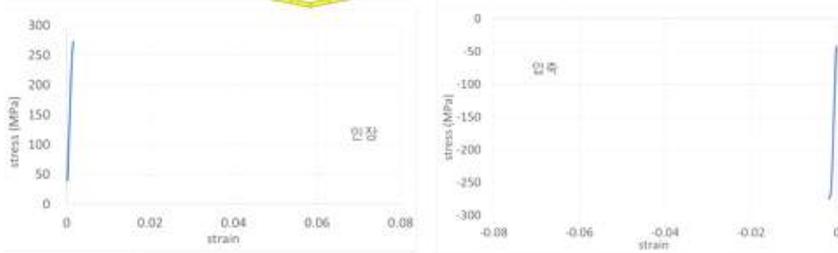
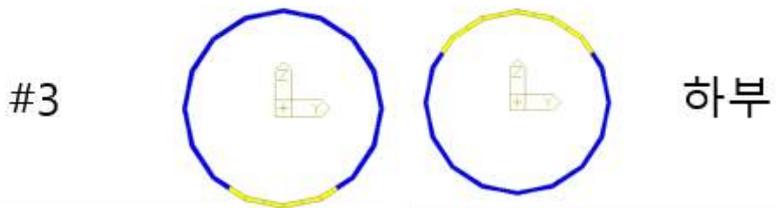
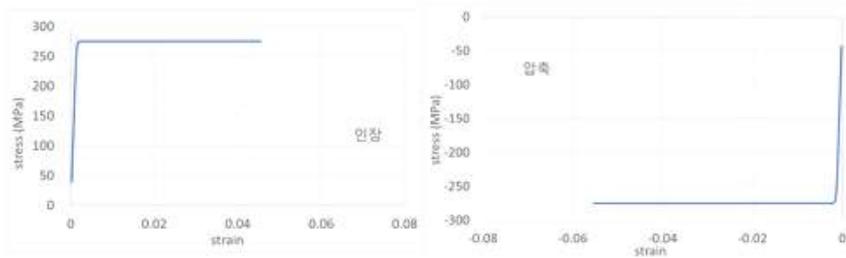
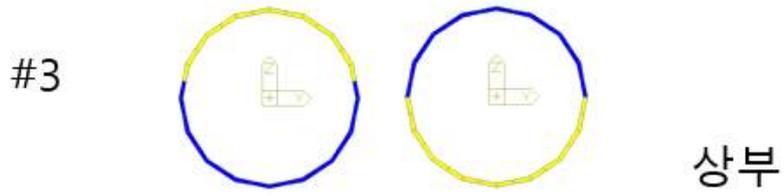
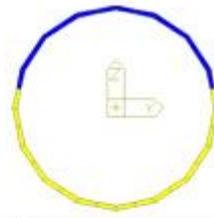
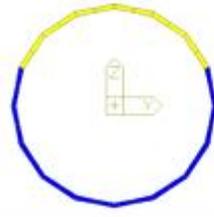
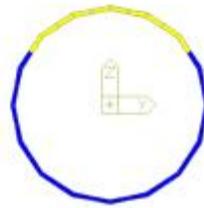
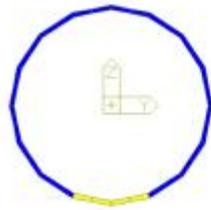
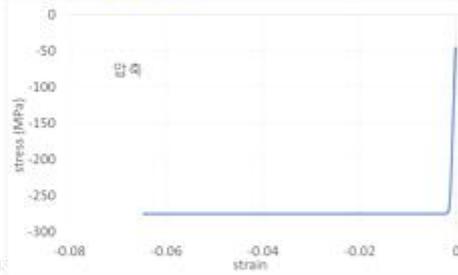
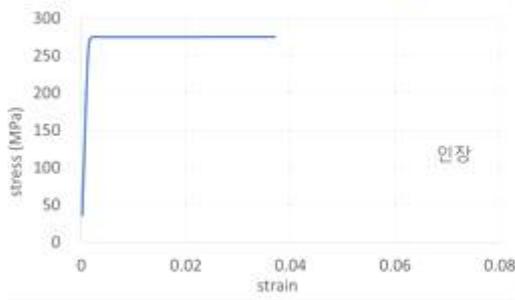


그림 3.10 힘-변위곡선 (기둥 3번)

#4



상부



하부

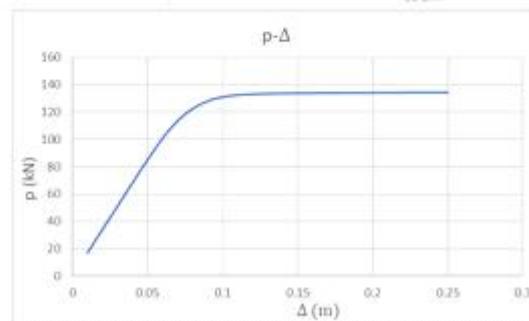
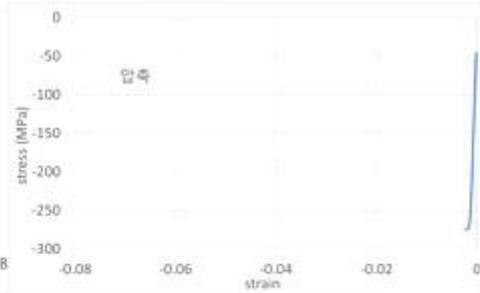
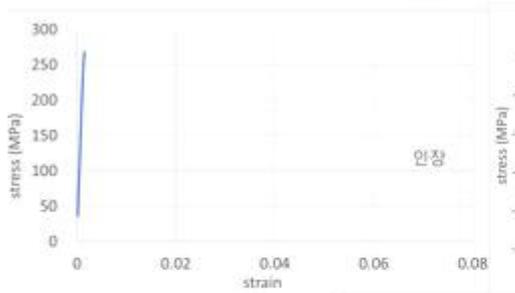
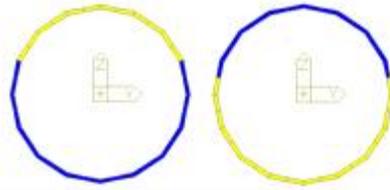
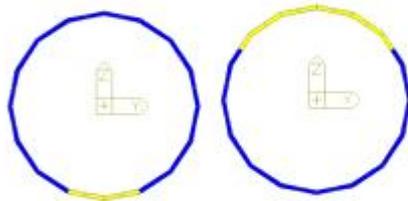
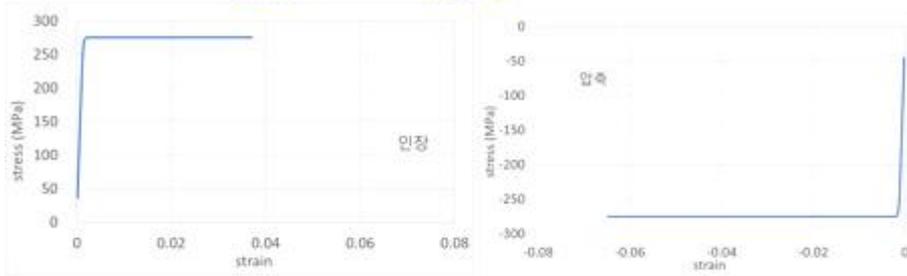


그림 3.11 힘-변위곡선 (기둥 4번)

#5



상부



하부

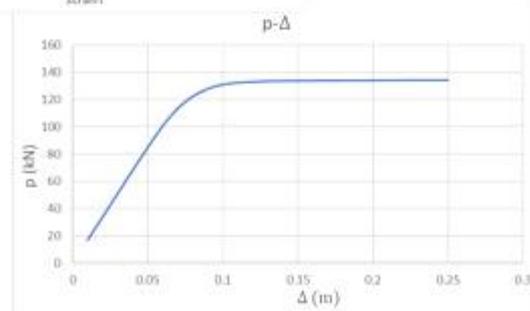
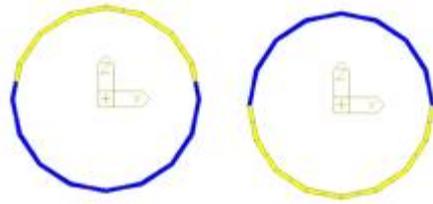
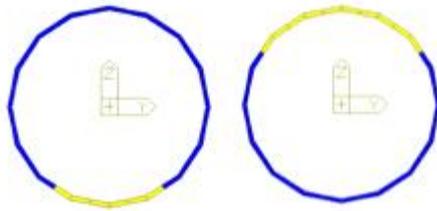


그림 3.12 힘-변위곡선 (기둥 5번)

#6



상부



하부

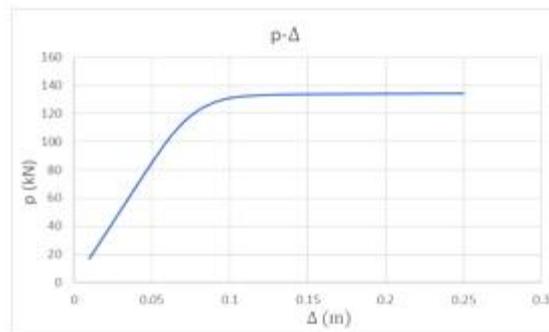
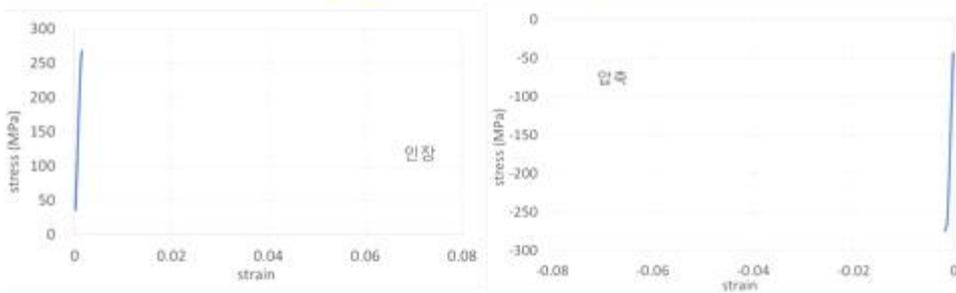


그림 3.13 힘-변위곡선 (기둥 6번)

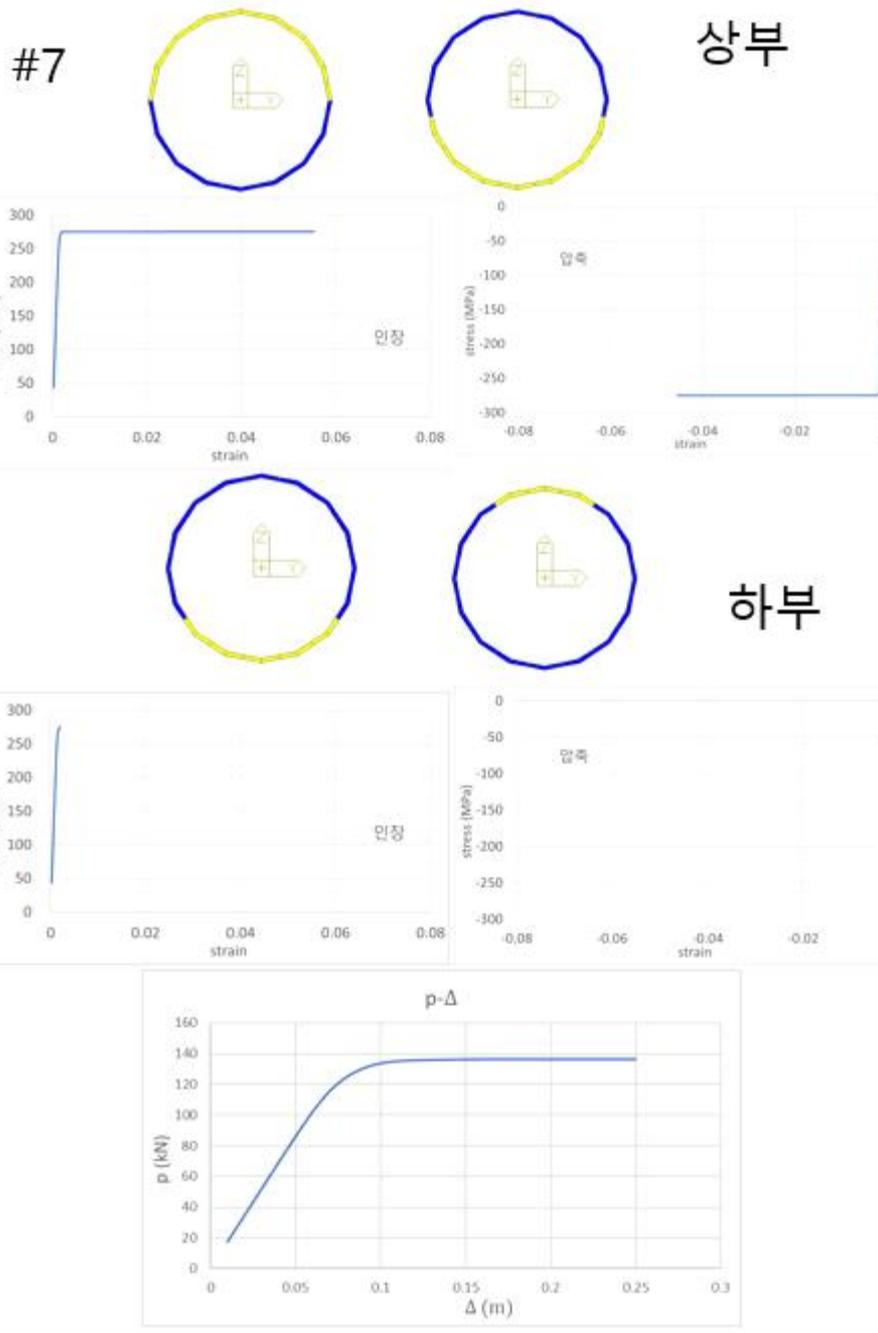
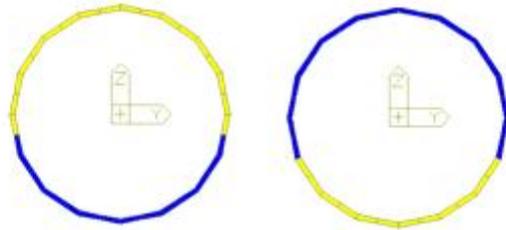
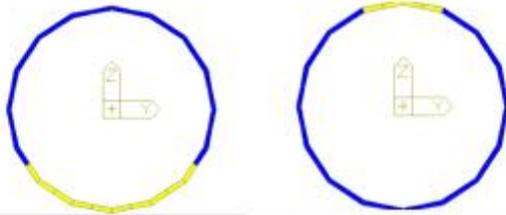
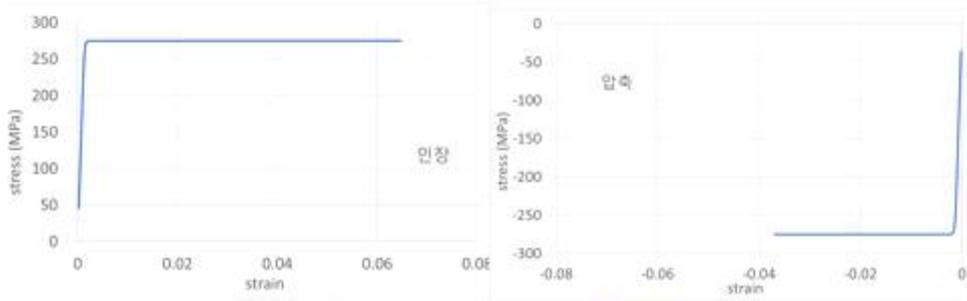


그림 3.14 힘-변위곡선 (기둥 7번)

#8



상부



하부

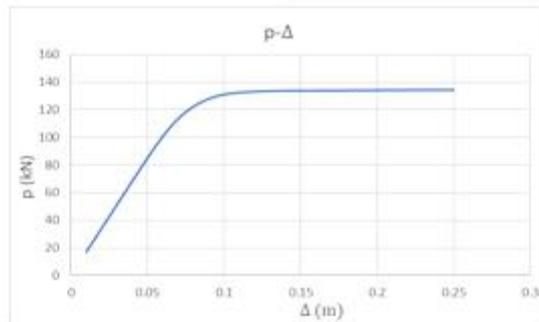


그림 3.15 힘-변위곡선 (기둥 8번)

브레이스가 있는 저장탱크(그림 3.16)의 경우 푸쉬오버 해석 결과는 다음과 같다. 마찬가지로 기둥 번호는 왼쪽 상단에서 시계방향으로 매겼다. 기둥의 상하부 단면 요소의 인장축, 압축축 해석결과와 응력-변형률 결과, p- $\Delta$  그래프를 그림 3.17 ~ 그림 3.24 로 나타내었고 브레이스가 없는 저장탱크와 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않았다.

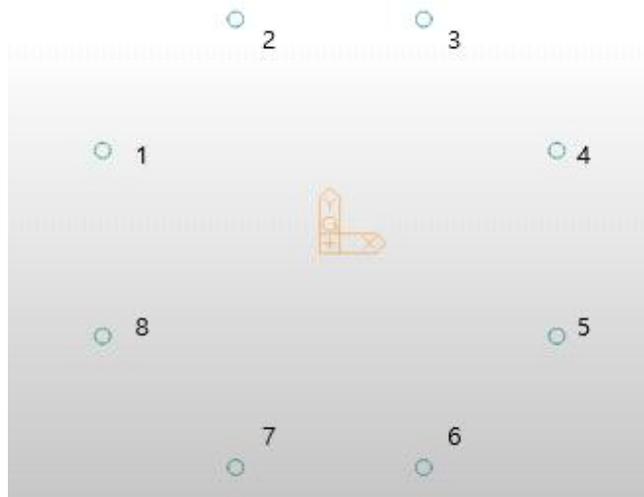
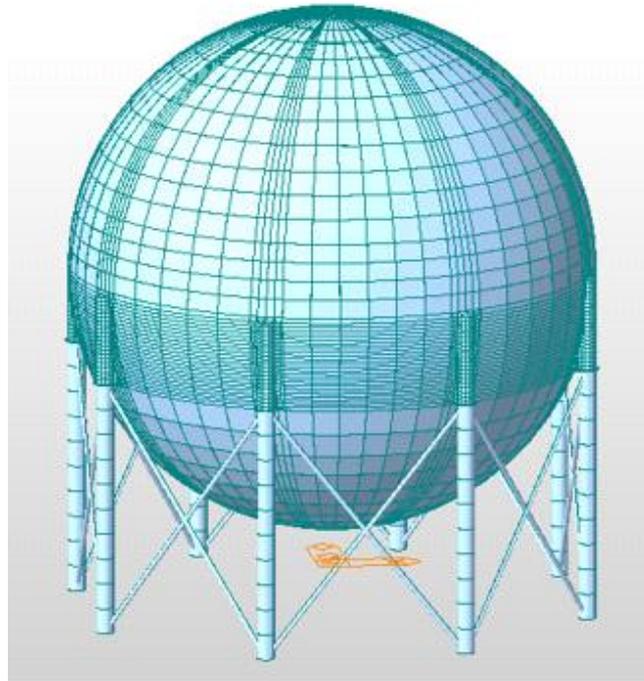


그림 3.16 브레이스가 있는 구형 저장탱크

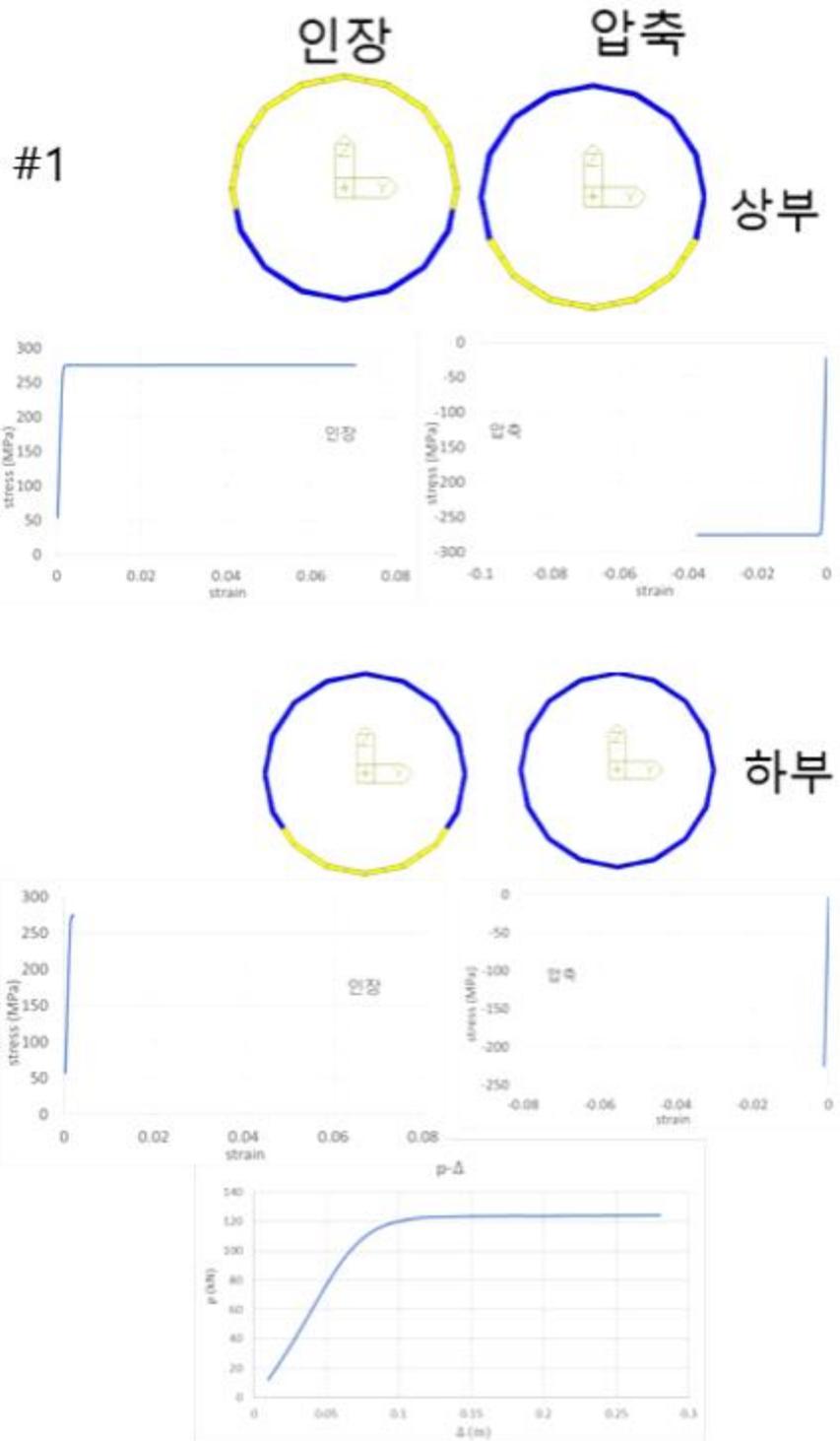


그림 3.17 힘-변위곡선 (기둥 1번)

#2

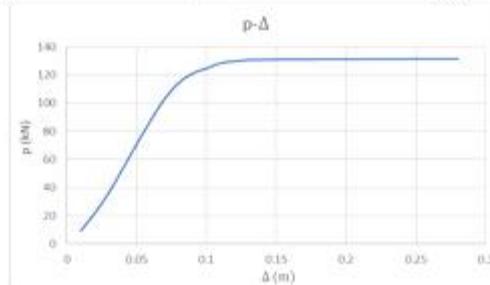
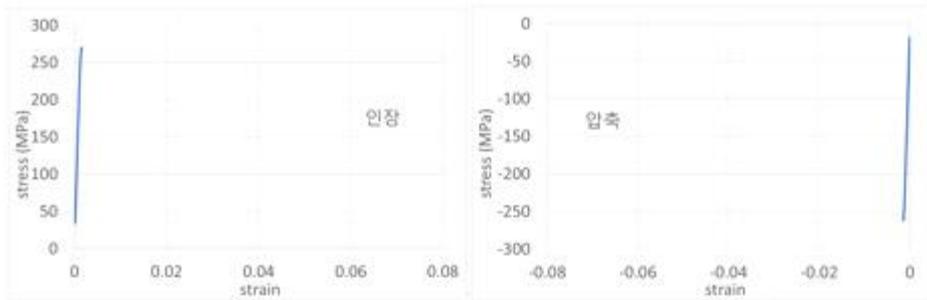
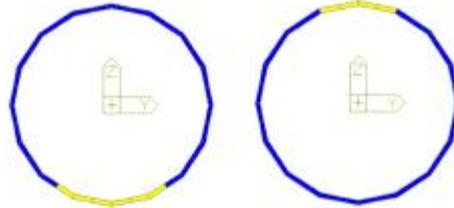
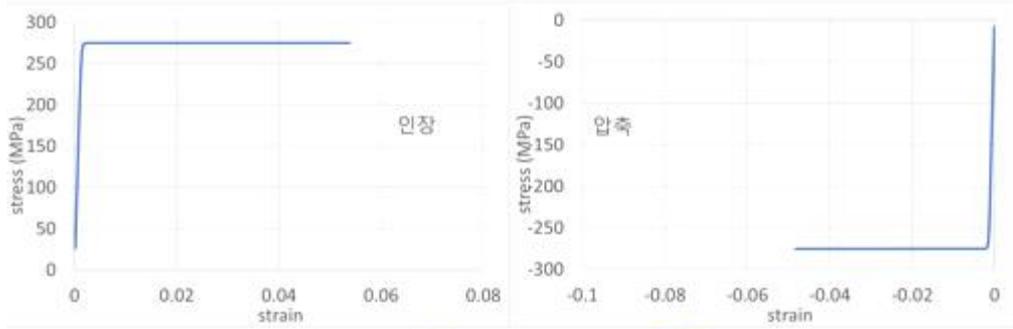
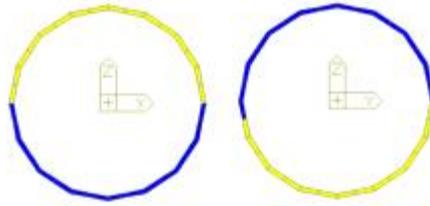


그림 3.18 힘-변위곡선 (기둥 2번)

#3

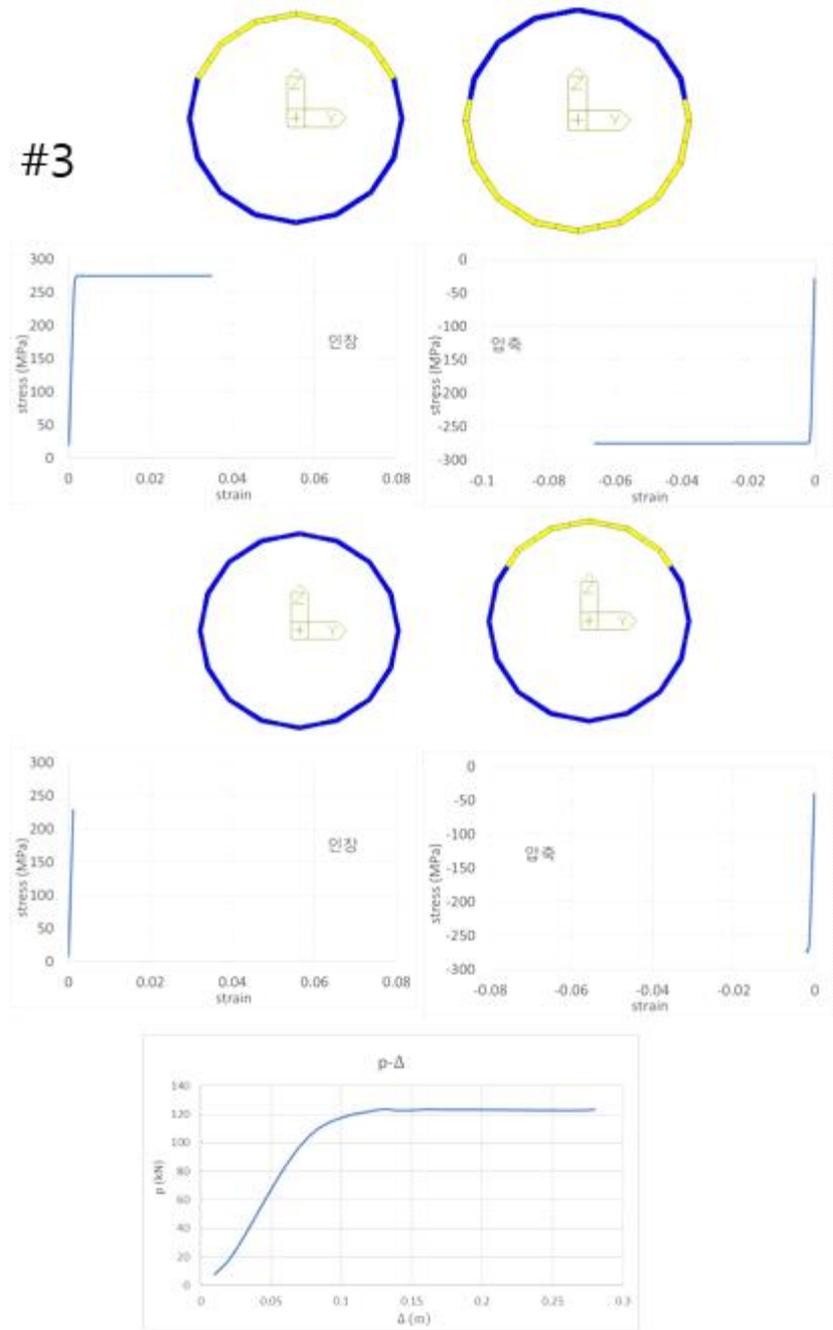


그림 3.19 힘-변위곡선 (기둥 3번)

#4

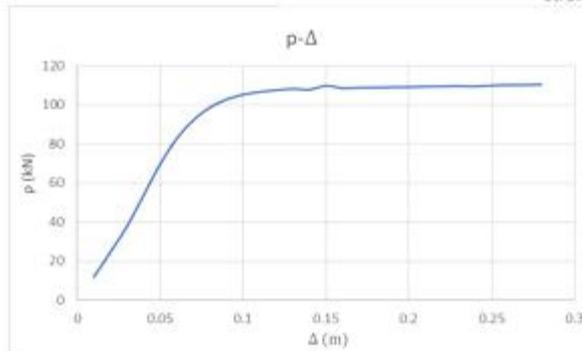
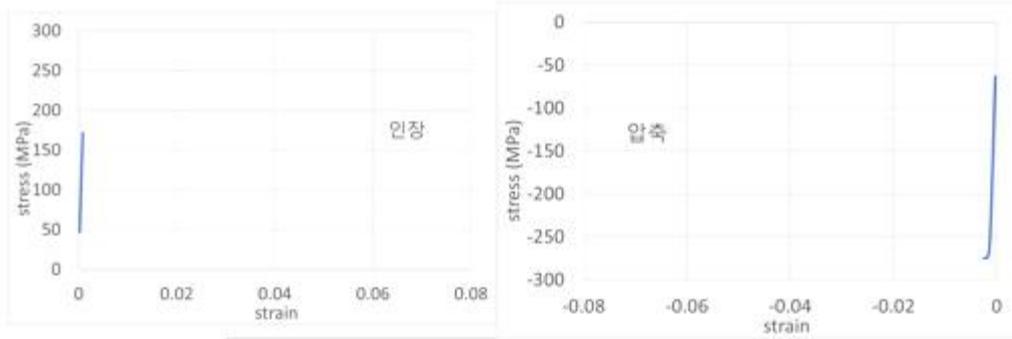
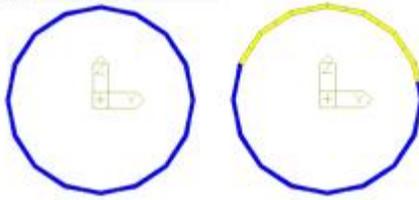
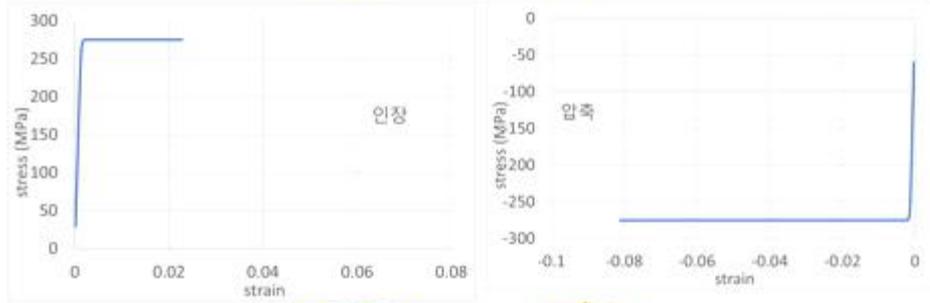
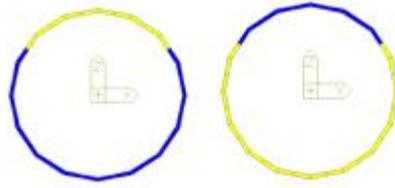


그림 3.20 힘-변위곡선 (기둥 4번)

#5

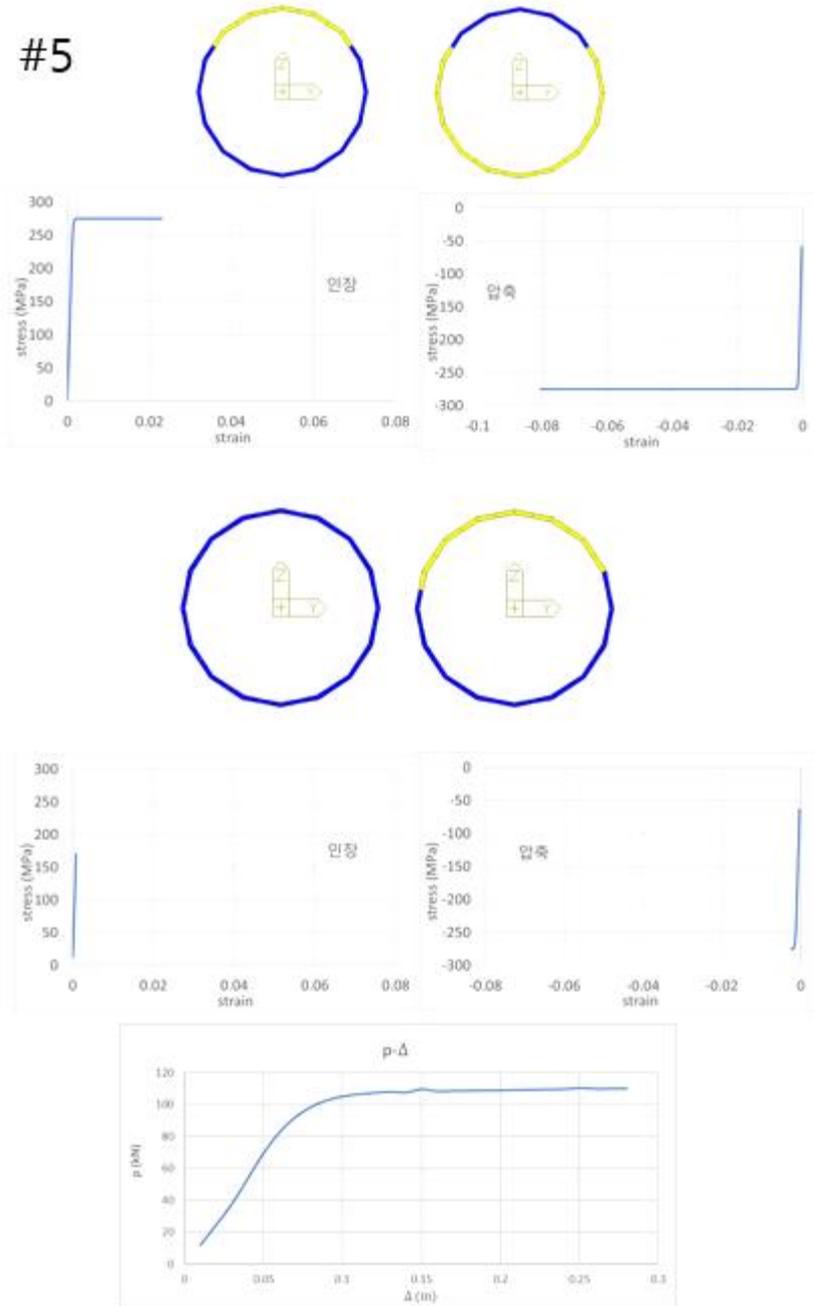


그림 3.21 힘-변위곡선 (기둥 5번)

#6

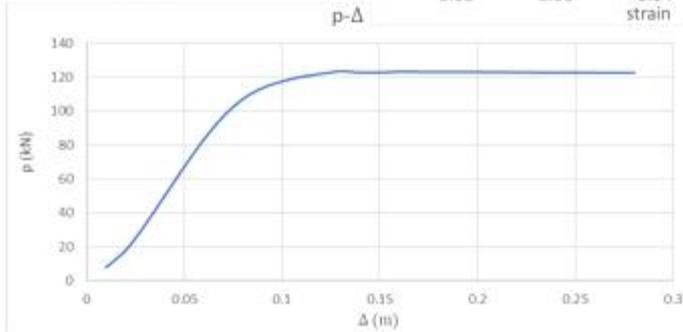
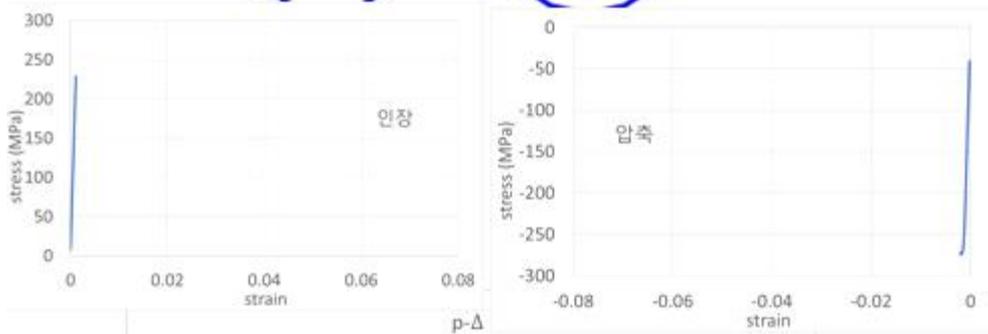
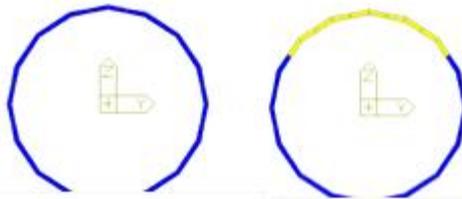
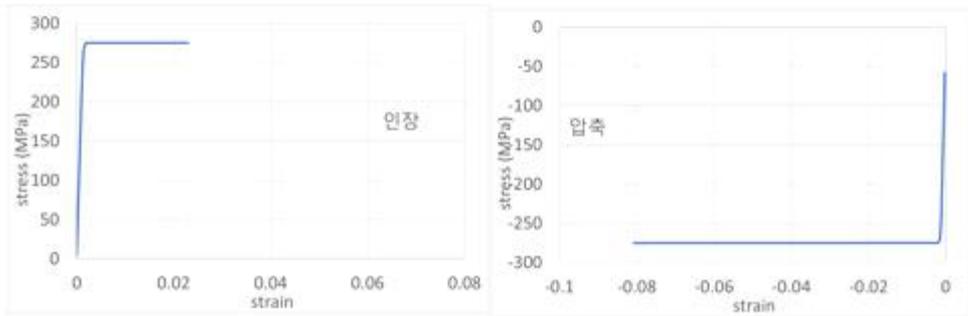
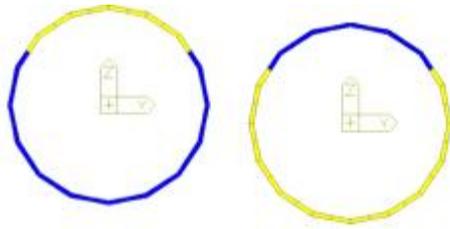


그림 3.22 힘-변위곡선 (기둥 6번)

#7

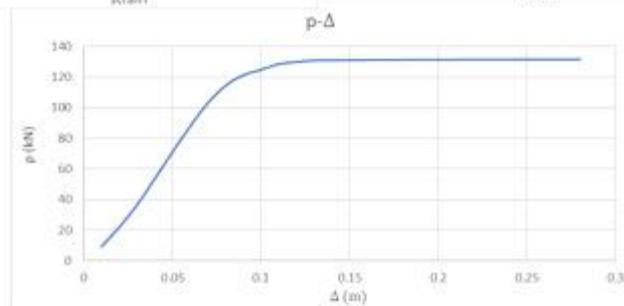
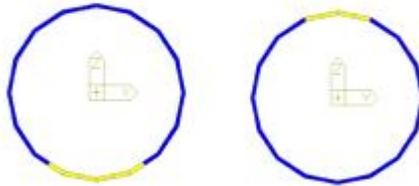
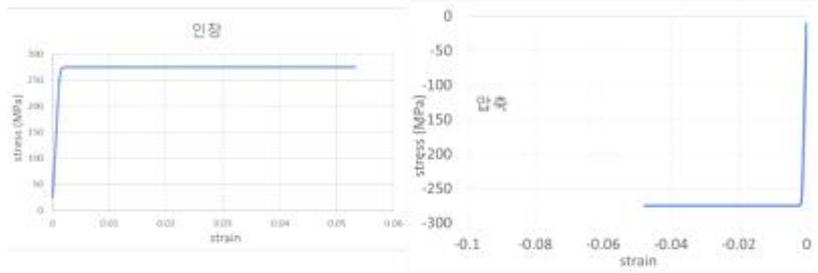
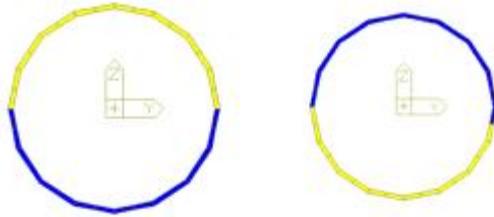


그림 3.23 힘-변위곡선 (기둥 7번)

#8

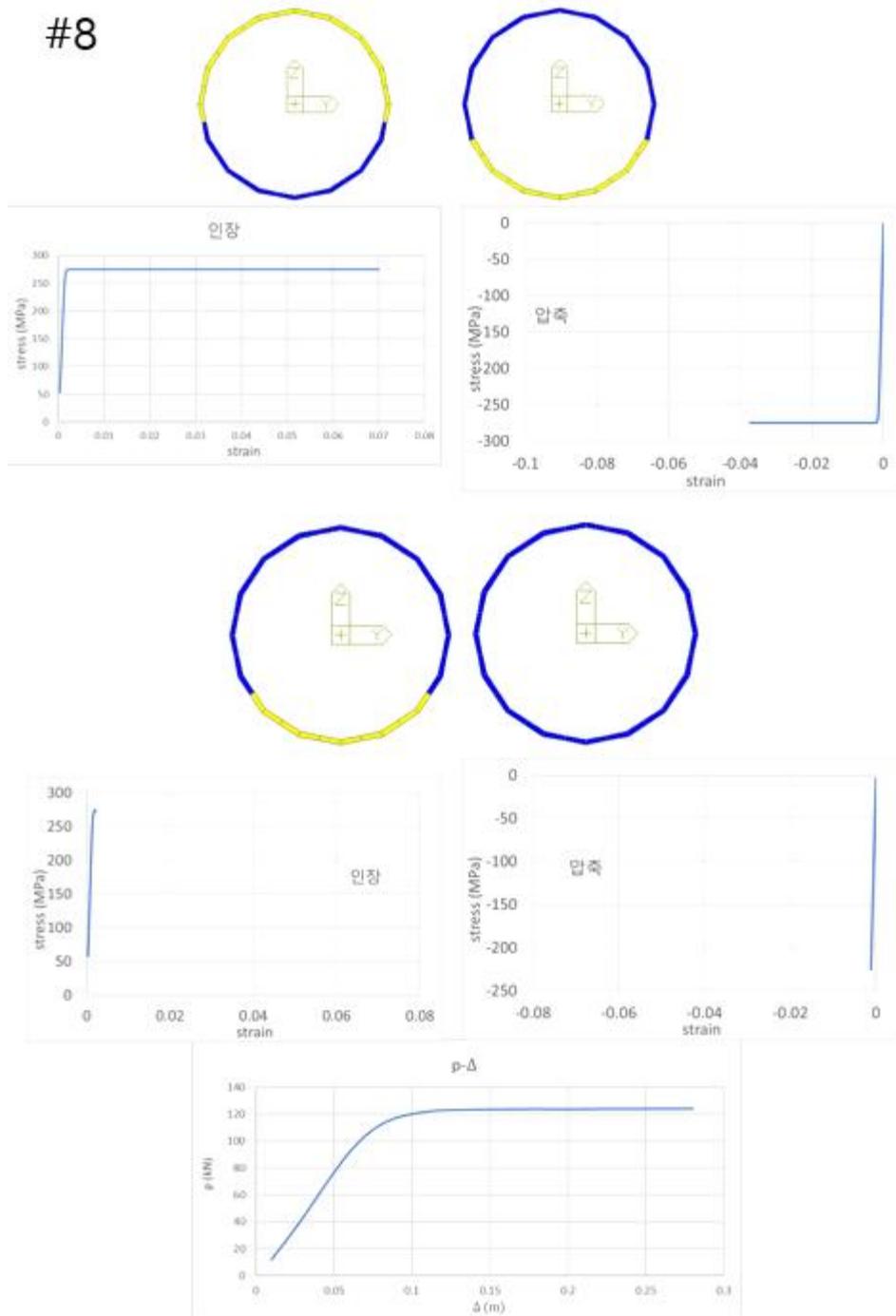


그림 3.24 힘-변위곡선 (기둥 8번)

### 3.2.3 비선형 동적해석

#### (1) 입력지반운동

입력지반운동 (가속도시간이력)에 대해 모델탱크의 응답변위( $\Delta_d$ )를 산정하였다. 비선형해석에서는 입력지반운동에 따라 응답변위가 달라지므로 응답의 통계적특성 (평균 및 변동계수)을 분석하기 위하여 SIMQKE를 사용하여 가속도시간이력 (그림 3.26)을 생성하였다. 탄성지진해석과의 일관성 유지를 위해 동일한 설계스펙트럼 (재현주기 1000년, S2지반)에 부합되게 생성하였으며 (그림 3.25), 가속도시간이력의 포락함수 형상은 ‘KDS 17 10 00’의 지진규모 5.5~6.0을 적용하였다.

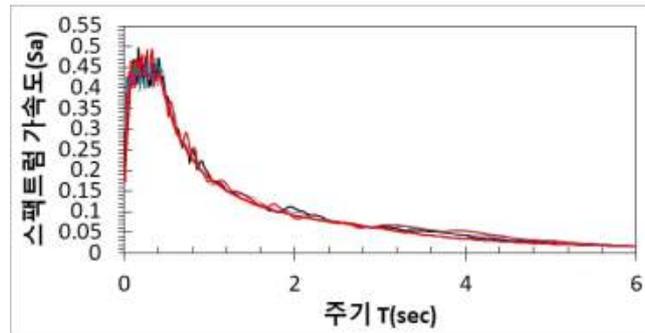


그림 3.25 인공합성지진과 부합성 검토

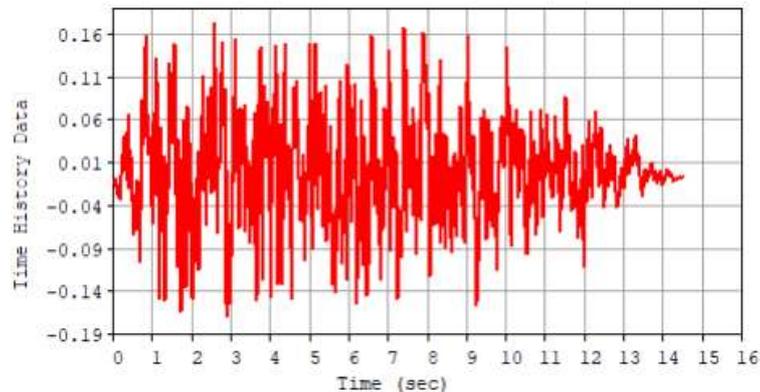


그림 3.26 입력 인공지진파

#### (2) 지진시 거동 분석

그림 3.27과 그림 3.28을 보면 브레이스의 좌굴이 제일 먼저 일어나고 다음으로 브레이스의 인장 항복, 기둥의 항복 순으로 일어나는 것을 확인할 수 있다.

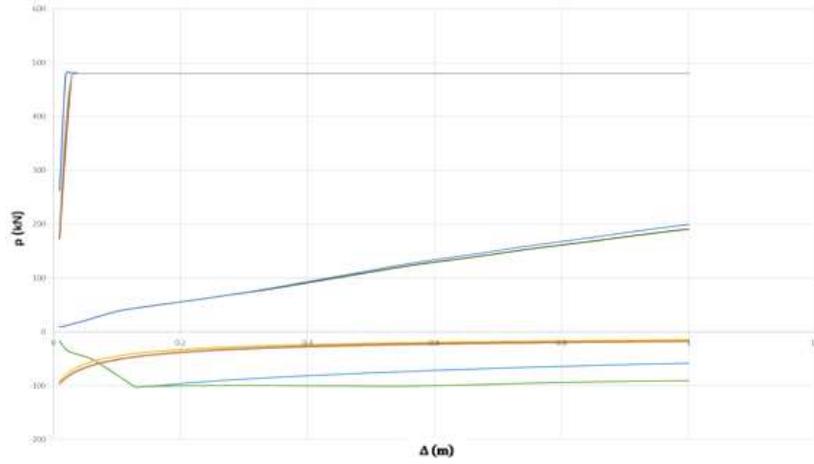


그림 3.27 브레이스의 p-Δ 그래프

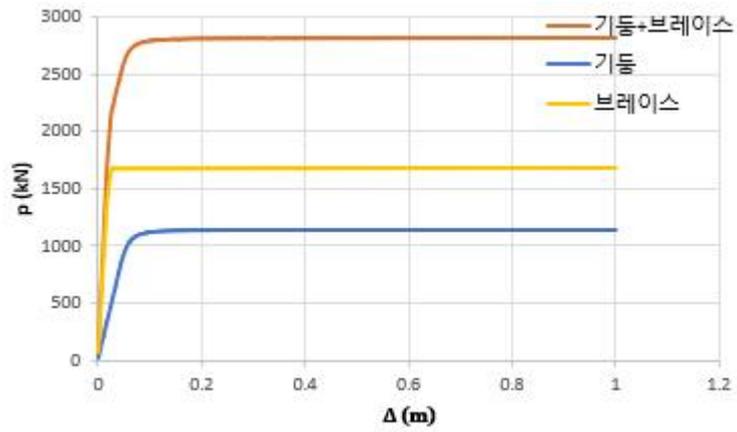


그림 3.28 기둥, 브레이스의 p-Δ의 비교 그래프

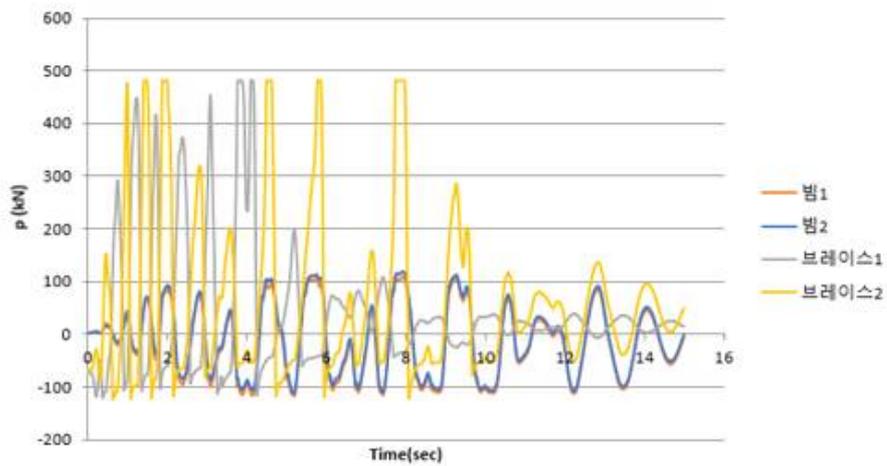


그림 3.29 입력 인공지진파에 따른 기둥과 브레이스의 시간이력그래프

(3) 브레이스 유무에 따른 지진거동 특성

브레이스가 없을 때 (그림 3.30)과 브레이스가 있을 때 (그림 3.31) 기둥의 전단력과 모멘트 분포도이다. 브레이스 유무에 따라 최댓값으로 비교하면 브레이스가 없는 저장탱크가 브레이스가 있는 저장탱크보다 약 5배 큰 값을 보였다.

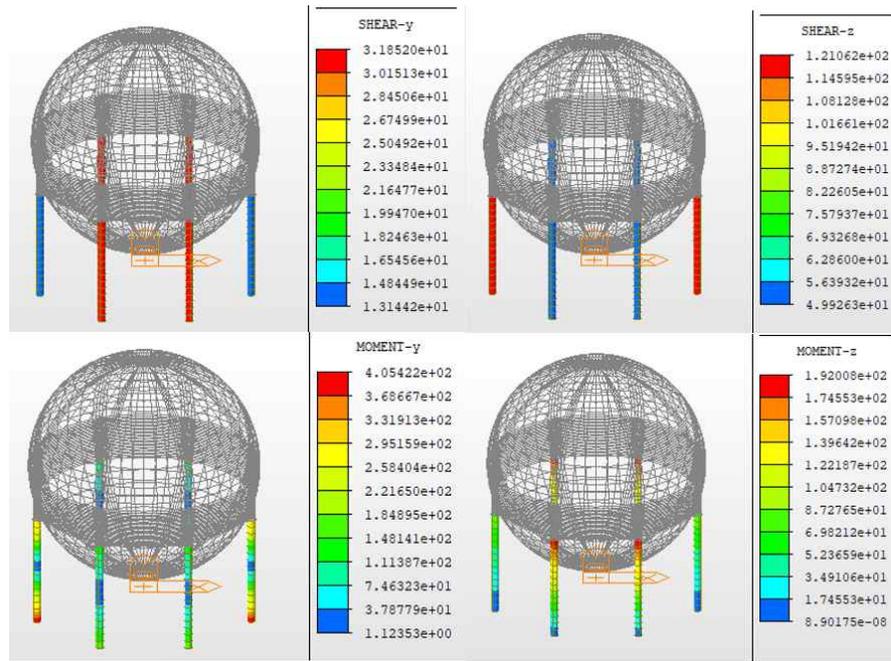


그림 3.30 S2 80% x방향 (브레이스 없음)

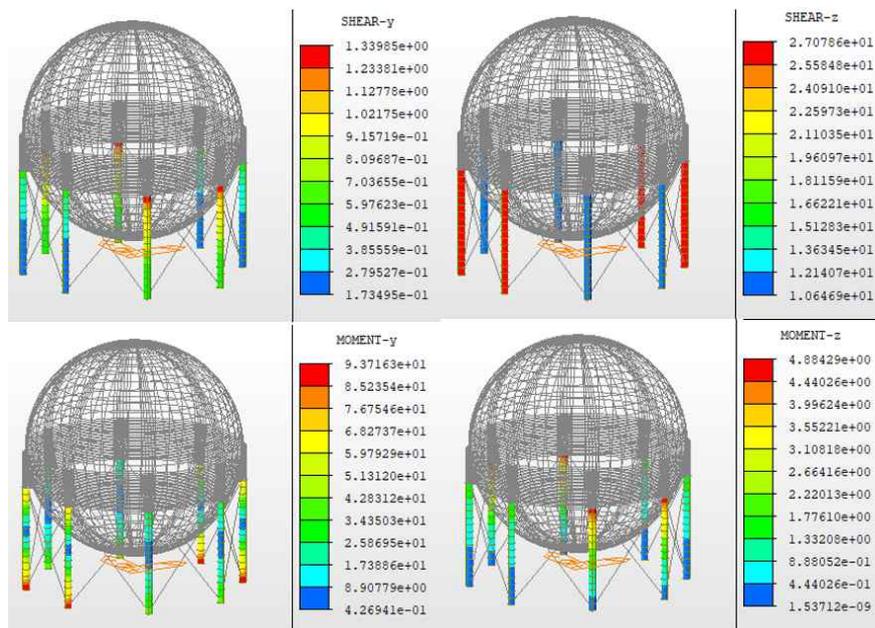


그림 3.31 S2 80% x방향 (브레이스 있음)

그림 3.32는 브레이스가 없는 저장탱크에서 기둥이 탄성일 때, 비탄성일 때, 브레이스가 있는 저장탱크에서 기둥과 브레이스가 탄성일 때, 기둥은 탄성이고 브레이스가 비탄성일 때 축력, 전단력, 모멘트를 비교한 그래프이다. 브레이스가 없을 때 기둥의 전단력과 모멘트가 더 크게 나타났다.

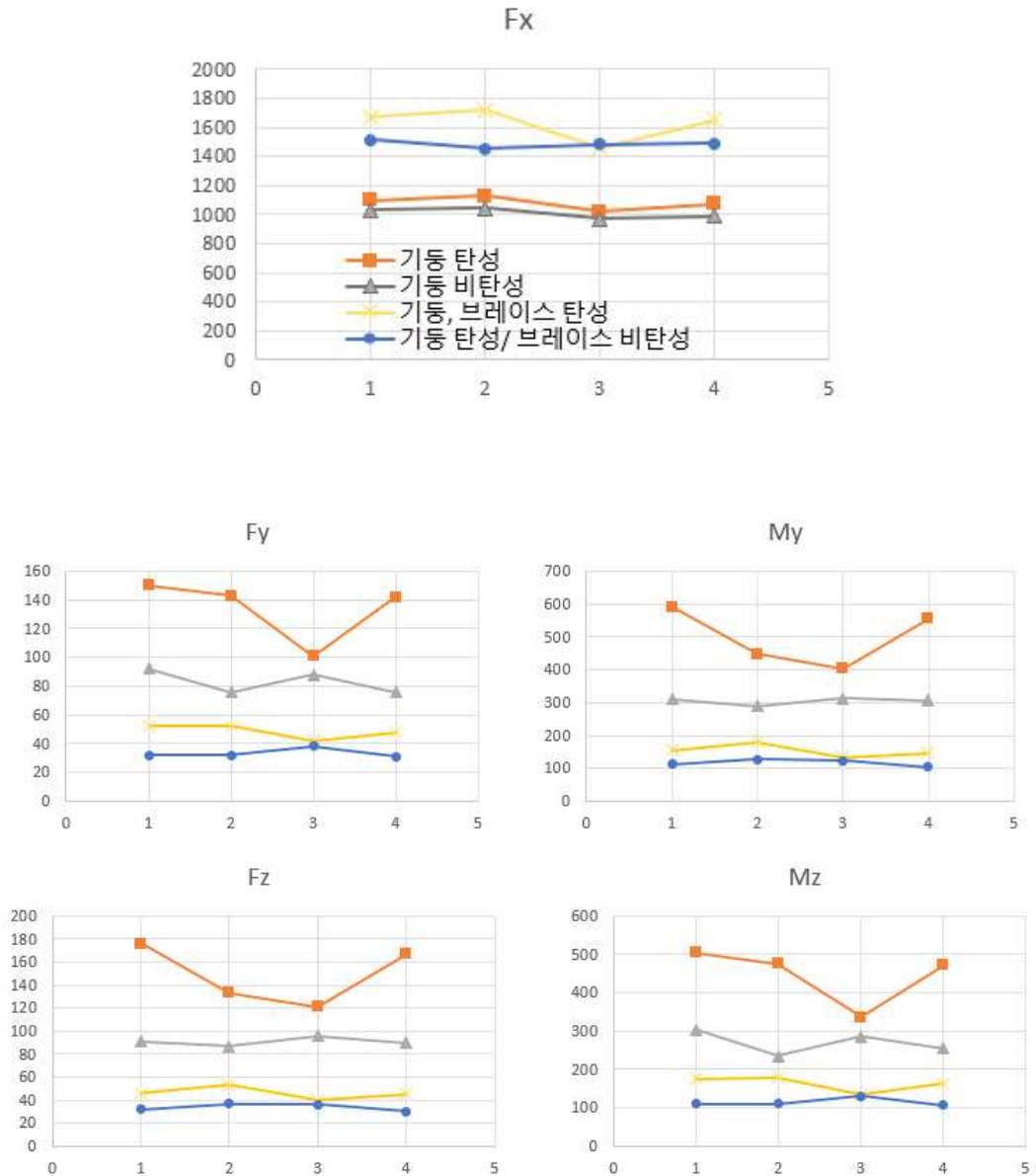
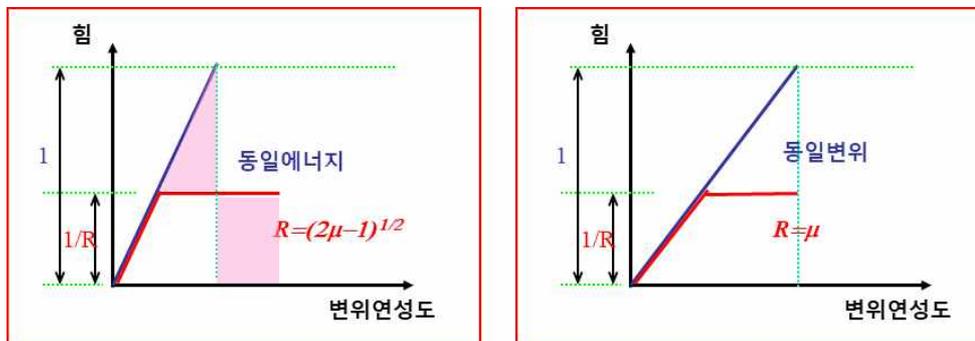


그림 3.32 모델별 기둥의 축력(kN), 전단력(kN), 모멘트(kN·m) 비교



그림 3.33(b)는 동일변위원리를 적용한 장주기 구조물의 응답수정계수( $R$ )-연성도( $\mu$ ) 관계를 나타내며, 대응선형 시스템과 완전탄소성시스템의 최대응답변위가 동일하므로 삼각형의 닳은꼴 공식을 적용하면  $1:1/R=\mu_m:1$ 이므로,  $R=\mu_m$ 이 된다.

표 3.4의 마지막 식(ATC/MCEER 제안식)은 우리나라 ‘KDS 24 17 11 교량내진설계기준(한계상태설계법)’에서도 채택한 식이다. 비교적 장주기 구조물( $T \geq 1.25T_s$ )의 경우  $\lambda_{DR}=1$ 이어서  $R=\mu$ 가 된다. 즉 변위동일법칙이 적용된 것이다. 단주기 구조물( $T < 1.25T_s$ )의 경우  $\lambda_{DR}$ 은  $R$ 과  $T$ 에 의해 결정되며 단주기 특성이 강할수록 에너지일정법칙과 유사해진다.



(a) 동일에너지(단주기)

(b) 동일변위(장주기)

그림 3.33 단주기 및 장주기 구조물의  $R-\mu-T$  관계

### 3.3.2 저장탱크의 지진거동의 통계적 특성

$R-\mu$ 의 관계 특성을 분석하기 위하여 지지부재의 항복강도를 조정하여  $R$ 이 1~5가 되는 5개의 해석모델을 작성하였다. 해석모델의 강성은 같기 때문에 진동주기와 탄성지진력은 동일하다.

입력지반운동에 대하여 응답이력해석(THA; Time History Analysis)을 수행하여 응답변위의 최댓값( $\Delta_d$ )을 구하고 이를 항복변위( $\Delta_y$ )로 나누어 소요변위연성도( $\mu_d$ )를 구하였다. 그림 3.33은 브레이스가 없는 볼탱크(주기 1.11sec)일 때의  $R-\mu$ 관계그래프이다. 그리고 브레이싱의 좌굴 하중을 조정하여  $R-\mu$ 의 관계 특성을 분석하였다.(표 3.5, 그림 3.34 ~ 그림 3.38)  $R$ 이 증가하면  $\mu_d$ 도 증가하며,  $\mu_d$ 의 분산도도 함께 커지는 모습을 보인다.  $R$ 에 따른  $\mu_d$ 의 평균값( $\mu_m^{THA}$ )의 관계를 기존의 제안식과 비교하였다(표 3.6). 식(3.3), (3.4)는 Newmark의 제안식이며, 식(3.5)는 교량기준의 제안식이다. 식(3.5)에서  $T \geq 1.25T_s$ 이면 식(3.4)와 식(3.5)는 같아진다. 모델탱크의 진동주기가 0.4(s)로 단주기영역에 가깝지만 식(3.4)가 해석결과와 가장 잘 부합한다.

$$\mu = (R^2 + 1)/2 \quad (0.12s \leq T \leq 0.5s) \quad \text{식(3.3)}$$

$$\mu = R \quad (T \geq 1s) \quad \text{식(3.4)}$$

$$\mu = \lambda_{DR}R \quad \text{식(3.5)}$$

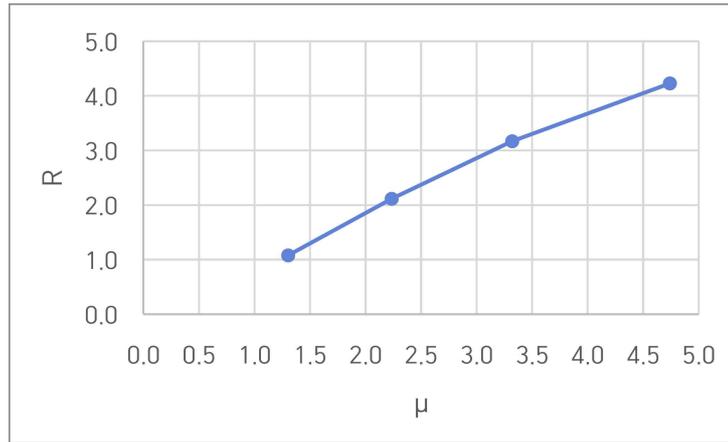


그림 3.34 브레이스 없는 구형 저장탱크  $R-\mu$

표 3.5 좌굴 하중 차이

기둥 항복 강도(MPa)	브레이싱 인장항복(kN)	브레이싱 좌굴18%(kN)	브레이싱 좌굴25%(kN)	브레이싱 좌굴40%(kN)
235	479	86	119	191
275	561	100	140	224
350	714	128	178	285
500	1020	183	255	408
700	1428	257	357	571
1200	2448	440	612	979

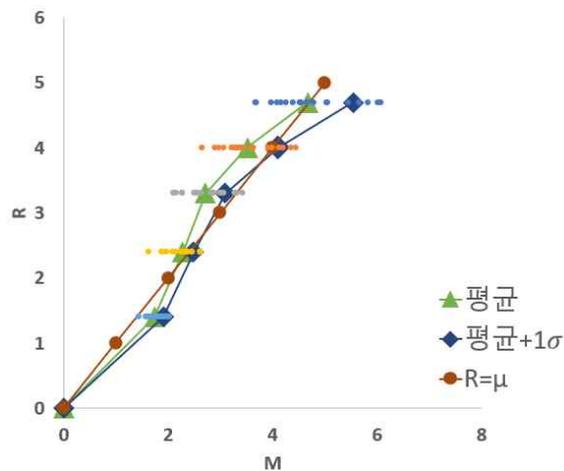


그림 3.35 브레이싱 좌굴 18%

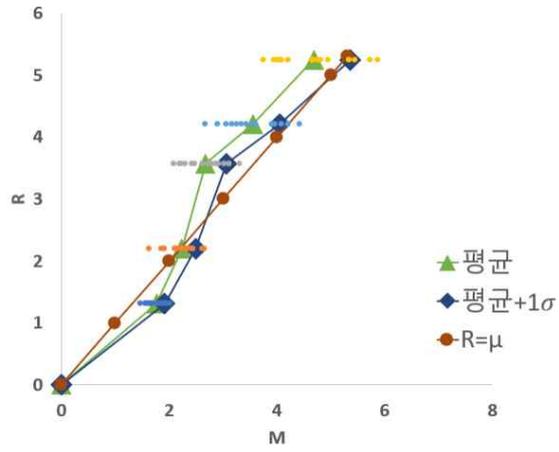


그림 3.36 브레이싱 좌굴 25%

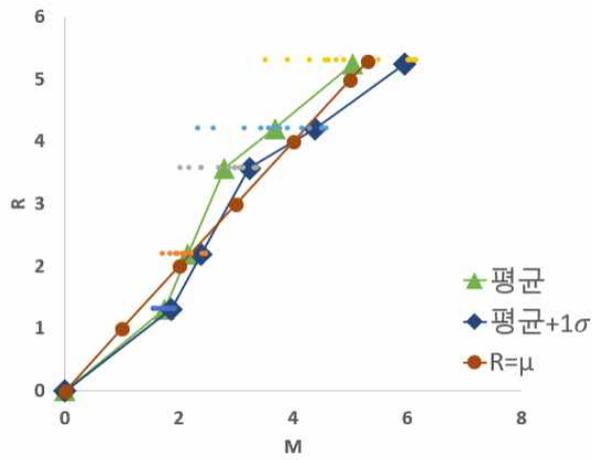


그림 3.37 브레이싱 좌굴 40%

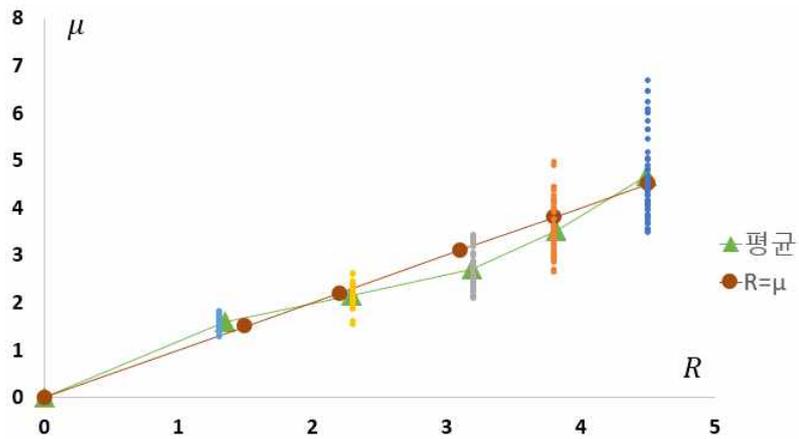


그림 3.38 브레이싱 좌굴 18%

$\mu_d$ 의 분포를 정규분포로 가정하여 표준편차( $\sigma^{RHA}$ )와 변동계수( $CV = \sigma^{RHA} / \mu_m^{RHA}$ )를 산정하여 표 3.6에 함께 나타내었다.  $R$ 에 대한  $CV$ 의 관계특성을 그림으로 나타내면 그림 3.39와 같다.  $R$ 이 증가하면  $CV$ 가 선형적으로 증가한다. 이를 정식화하면 식(3.6)과 같다.

$$CV = 0.03R + 0.04 \quad (1 \leq R < 5.0) \quad \text{식(3.6)}$$

$R=1\sim 5$ 일 때의 변위연성도 정규분포 그래프는 그림 3.39 ~ 그림 3.44와 같다.

표 3.6 분석결과 비교

$R$	THA		$\mu^{Prop} (\mu^{Prop} / \mu_m^{THA})$		
	$\mu_m^{THA}$	$\sigma^{THA}$ ( $CV$ )	식(3.3)	식(3.4)	식(3.5)
1.3	1.6	0.013 (0.09)	1.35 (0.84)	1.30 (0.81)	1.39 (0.87)
2.3	2.2	0.015 (0.10)	3.15 (1.43)	2.30 (1.05)	2.68 (1.22)
3.2	2.7	0.023 (0.14)	5.62 (2.08)	3.20 (1.19)	3.85 (1.42)
3.8	3.5	0.030 (0.17)	7.72 (2.21)	3.80 (1.09)	4.62 (1.32)
4.5	4.7	0.035 (0.19)	10.63 (2.26)	4.50 (0.96)	5.53 (1.18)
$\mu^{Prop} / \mu_m^{THA}$ 평균			1.76	1.02	1.20

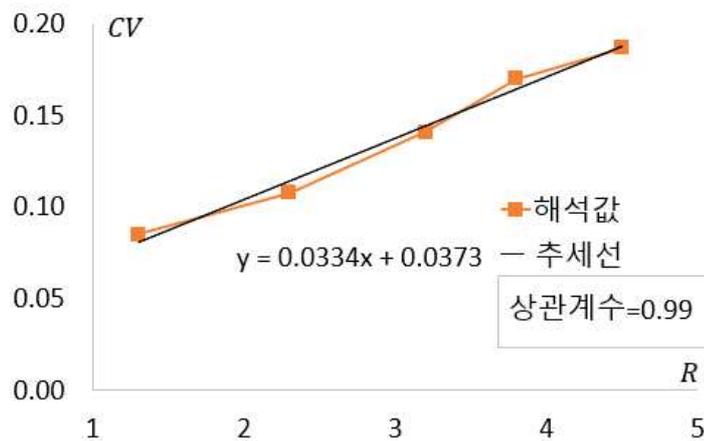


그림 3.39 CV-R

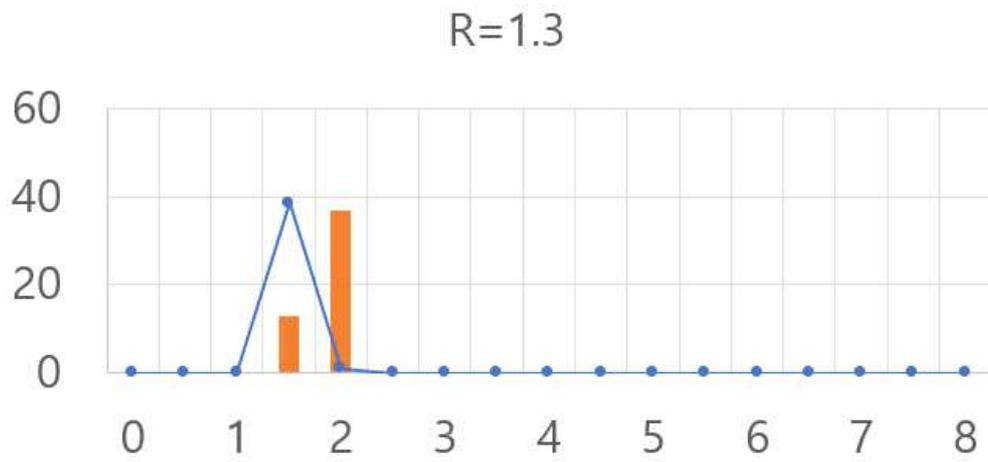


그림 3.40 R=1.3의 경우의 분포특성

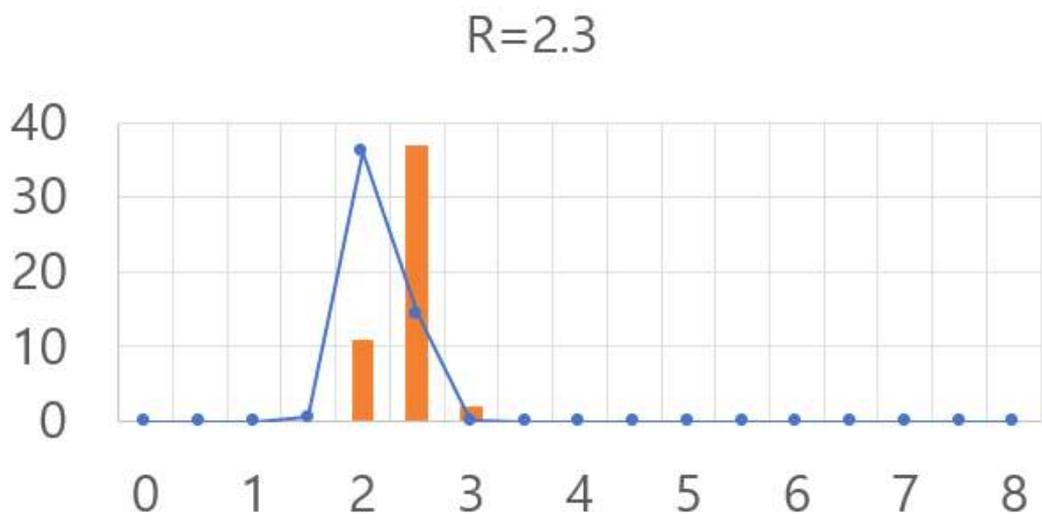


그림 3.41 R=2.3의 경우의 분포특성

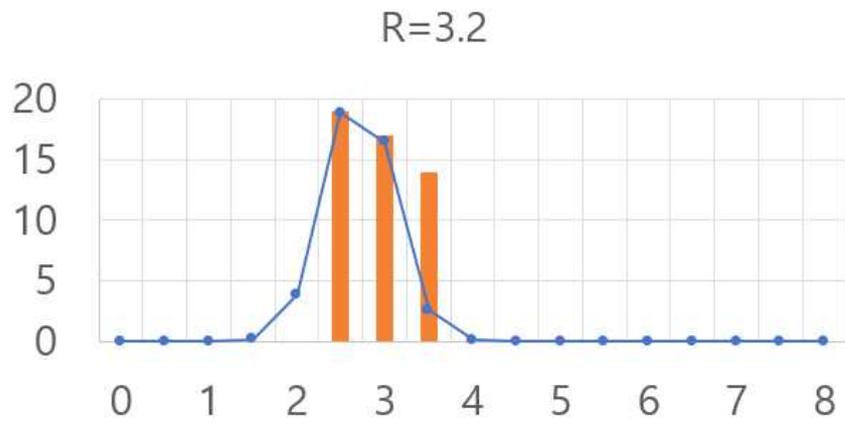


그림 3.42 R=3.2의 경우의 분포특성

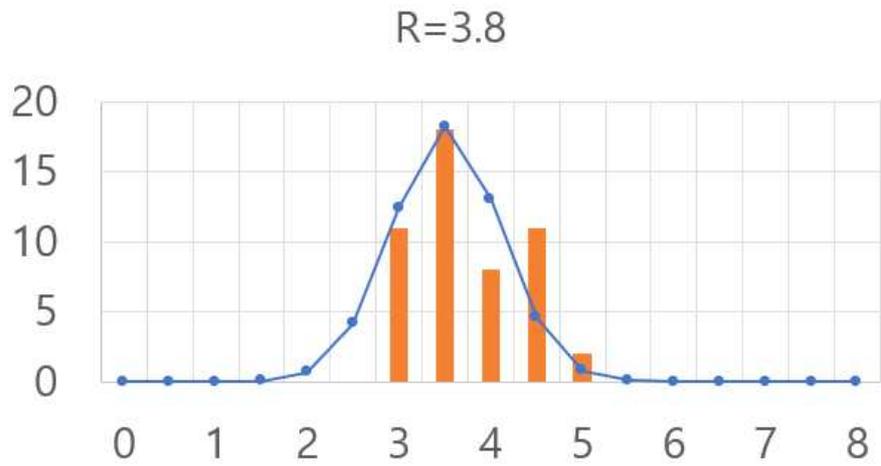


그림 3.43 R=3.8의 경우의 분포특성

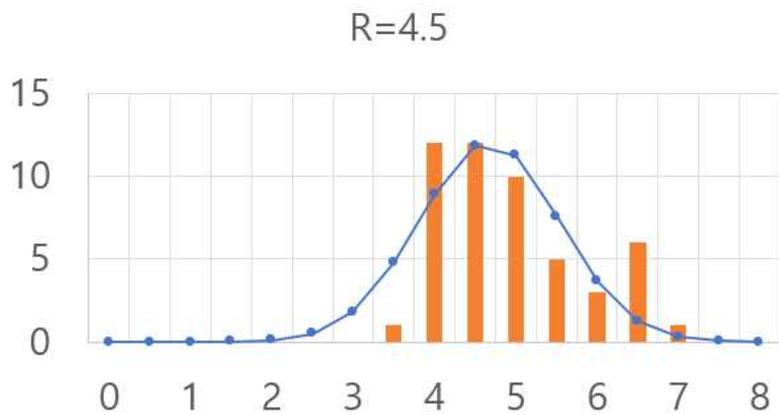


그림 3.44 R=4.5의 경우의 분포특성

## 제 4장 신뢰도 기반의 성능기반 내진설계 제안

### 4.1 성능기반 내진설계

성능기반 내진설계는 비선형해석법을 사용하여 구조물의 초과강도와 비탄성변형능력을 보다 정밀하게 구조모델링에 고려하여 구조물이 주어진 목표성능 수준을 정확하게 달성하도록 설계하는 기법이다. 기준에서 정의하고 있는 바와 같이 성능기반 내진설계를 위해서는 구조물에 대한 비선형해석이 요구되며, 해석의 신뢰도를 향상하기 위해서는 실제 구조물의 거동을 보다 정확하게 모사할 수 있는 비선형해석모델이 제시되어야 한다. 성능기반 내진설계의 일반 절차는 그림 4.1과 같다.



그림 4.1 성능기반 내진설계 일반 절차

1. 성능기반 내진설계를 위한 해당 건축물의 내진성능목표를 내진등급별 성능목표에 따라 설정한다.
2. 설정한 내진성능목표를 고려하여 예비설계에 따라 각 구조부재와 접합부에 대한 예비설계를 수행한다.
3. 예비설계를 통하여 결정된 구조부재 및 접합부 상세를 토대로 선형 또는 비선형 해석모델을 수립한다.
4. 목표성능수준의 달성 여부는 선형동적절차, 비선형정적절차 또는 비선형동적절차를 통하여 판정한다. 목표성능수준에 미달할 경우 반복설계를 통해 목표성능수준을 만족시킨다.

## 4.2 신뢰도 기반의 성능기반 내진설계

시설물 내진설계의 공통기준에 해당하는 ‘KDS 17 10 00 내진설계 일반’에는 기능수행, 즉시복구, 장기복구 및 붕괴방지의 4단계의 내진성능수준을 규정하고 있다. 이들 내진성능수준은 시설물의 손상크기에 대응되며 붕괴방지수준으로 갈수록 큰 손상을 허용한다.

지진 시 시설물의 손상크기는 시설물이 보유한 변형성능(보유변위연성도,  $\mu_c$ )에 대한 응답변위(소요변위연성도,  $\mu_d$ ) 크기의 비( $\mu_d/\mu_c$ )로 나타낼 수 있다. 설계지진에 대한 시설물의 비선형응답변위는 분산도가 크기 때문에 충분한 연성도가 확보되어야 4단계의 성능수준(기능수행, 즉시복구, 장기복구 및 붕괴방지 수준)이 정의될 수 있다. 이를 위해 이 연구에서는 최소 보유변위연성도를 5.0으로 제시하였다.

그림 4.2는 보유변위연성도( $\mu_c$ )가 5.0 이상인 시설물의 내진성능수준별 구간(범위)를 나타낸 것으로 소성변위연성도( $\mu_{pl} = \mu_c - 1$ )를 3등분하여 각각 부여하였다. 반면, ASCE 41에서는 IO(Immediate Occupancy), LS(Life Safety), CP(Collapse Prevention)의 한계값을 각각 극한변위의 50%, 75%, 100%로 정의하고 있다. 표 4.1은  $\mu_c$ 에 따른 각 내진성능 구간의 한계값( $\mu_{lim}$ )이며 비교를 위해 ASCE의 IO와 LS의 한계값을 ( )안에 함께 나타내었다. ASCE에 비해 본 연구의 한계값이 조금 보수적으로 설정된 것을 알 수 있다. 만약 설계된 시설물의 설계지진에 대한 응답, 즉 소요변위연성도( $\mu_d$ )가 각 구간의  $\mu_{lim}$ 를 초과하지 않는다면 요구 내진성능수준을 만족한다고 간주할 수 있으므로 해석법으로 검증하는 경우 이를 확인하면 된다.

표 4.1 성능구간별 한계값 분류표

$\mu_c$	구간별 한계값( $\mu_{lim}$ )		
	즉시복구	장기복구	붕괴방지
1.0	×	×	×
2.0	×	×	×
3.0	×	×	3.0
4.0	×	2.50	4.0
5.0	2.33(2.50)	3.67(3.75)	5.0
6.0	2.67(3.00)	4.33(4.50)	6.0
7.0	3.00(3.50)	5.00(5.25)	7.0
8.0	3.33(4.00)	5.67(6.00)	8.0

성능기반으로 설계된 시설물이 설계지진에 대한 소요변위연성도( $\mu_d$ )가 표 4.1에 정의된 성능구간의 한계값( $\mu_{lim}$ )을 초과하지 않는다면 소요내진성능수준을 만족하게 된다. 이를 위해서는 비선형동적해석을 통한 검증이 필요하다. 다만 설계지진에 대한 지진거동 특성의 통계적 특성을 안다면 이를 활용하여 시설물을 설계(대안적 설계)할 수 있다.

응답변위가 상당한 분산도를 지니고 있으므로 요구되는 내진성능 구간 내에 신뢰성 있게 들어올 수 있도록 ‘목표변위연성도( $\mu_{tar}$ )’를 잘 설정할 필요가 있다(그림 4.2).  $\mu_{tar}$ 이 적정하게 설정되었다면 이를 만족하는 ‘설계응답수정계수( $R_{design}$ )’를 결정할 수 있다.  $R_{design}$ 을 결정하는 구체적인 절차는 그림 4.3과 같다.

‘ $\mu_c$ ’와 ‘요구내진성능’이 결정되면 표 4.1에 따라 ‘ $\mu_{lim}$ ’를 결정한다. 요구내진성능수준의 ‘목표비초과확률’을 설정하면 이를 만족하는 ‘ $k_{tar}$ ’ 값이 결정된다(그림 4.4). ‘ $R_{design}$ ’를 가정하면 식(3.6)으로 ‘CV’가 결정된다.  $\mu_d$ 의 분포를 정규분포로 가정하면 식(4.1), 식(4.2)로부터 ‘ $\mu_{tar}$ ’를 결정할 수 있다.  $\mu_{tar}$ 이 결정되면 식(4.3)으로부터 설계 시 필요한 ‘설계응답수정계수( $R_{design}$ )’를 산정할 수 있다. 이와 같이 산정된  $R_{design}$ 이 처음에 가정한  $R_{design}$ 과 같다면 최종적인  $R_{design}$ 이 된다. 따라서 탱크의 탄성지진력을 이 설계응답수정계수( $R_{design}$ )로 나눈 값을 설계지진력으로 하여 설계하면 요구하는 내진성능을 설정한 신뢰도(목표 비초과확률)로 만족하게 된다.

$$\mu_{lim} = \mu_{tar} + k_{tar}\sigma \tag{4.1}$$

$$\frac{\mu_{lim}}{\mu_{tar}} = 1 + k_{tar} \frac{\sigma}{\mu_{tar}} = 1 + k_{tar} \cdot CV \tag{4.2}$$

$$\mu_{tar} = R_{design} \tag{4.3}$$

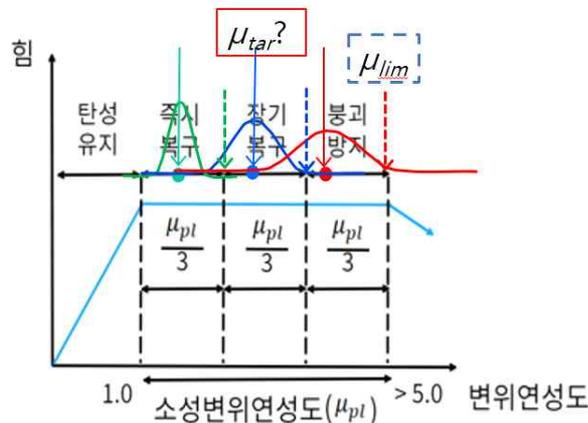


그림 4.2 성능구간별 연성도의 분산 정도

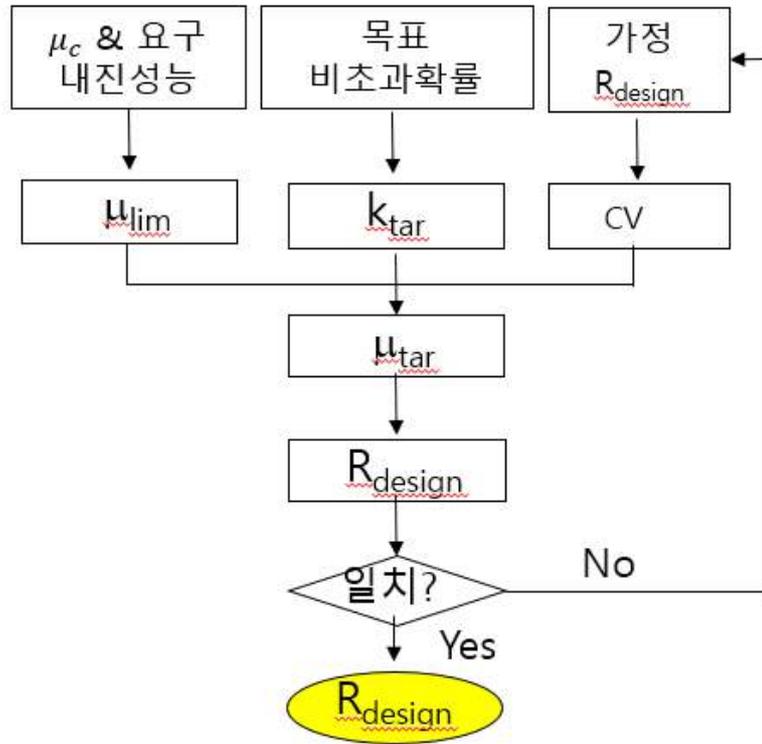


그림 4.3  $R_{design}$  결정 순서

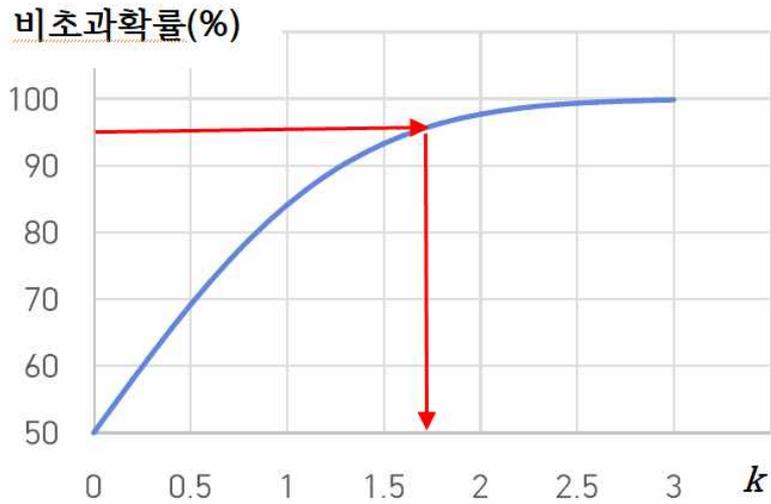


그림 4.4 비초과확률에 따른 k값

## 제 5장 결론

산업시설은 지진 시 운전성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 현행 내진설계는 시설물의 구조적인 안전을 확보하기 위해 붕괴방지수준 또는 기능수행(탄성유지)수준을 만족하도록 제시되어 있다. 시설물의 거동 특성에 따라, 시설물의 운전성 확보를 위해 그 외 다른 내진성능수준을 목표로 설계할 필요가 있다. 즉, 다단계의 내진성능을 설정하고 이의 만족 여부를 검증하는 성능기반 내진설계가 필요하다. 이 연구에서는 비선형 지지부재를 갖는 구형 저장탱크를 대상으로 지진거동특성을 분석하고 이를 기반으로 하여 신뢰성 기반 성능기반 내진설계법을 제시하였다.

이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기둥과 브레이스로 지지되는 구형저장탱크는 지지부재의 항복 및 좌굴로 복잡한 거동 특성을 보이며, 브레이스의 좌굴을 고려하지 않는다면 탱크의 강도를 과대평가하게 되어 적합한  $R-\mu$  관계를 도출할 수 없다.
2. 예제 탱크의 진동주기는 0.4(s)이며, 이 경우의  $R-\mu$  관계는 동일변위(Equal Displacement) 관계식( $R=\mu$ )과 잘 부합한다.
3. 설계지진에 대한 소요변위연성도의 변동계수(CV)는  $R$ 이 증가할수록 거의 선형적으로 증가한다( $CV=0.03R+0.04$ ).
4. 특정 보유변위연성도( $\mu_c$ )를 확보한 저장탱크의 소요변위연성도( $\mu_d$ )가 요구내진성능수준( $\mu_{lim}$ )을 특정 비초과확률로 초과하지 않도록 설계하는데 필요한 설계응답수정계수( $R_{design}$ )을 구하는 절차를 제시하였다.
5. 이 연구에서는 진동주기 0.4(s)인 구형 탱크에 대해 분석하였으며 향후 다양한 진동주기를 갖는 탱크의 거동특성 분석이 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준
2. 산업환경시설의 설계하중과 내진성능목표 개선안, 대한토목학회 논문집, 42권6호, 763-773, (2022.12)
3. Performance based building : conceptual framework, Final Report, PeBBu, (2005)
4. Final report of CIB task group 11 : Performance based building codes, National Research Council Canada, (1997)
5. Vision 2000-Performance based Seismic Engineering of Buildings, SEAOC, (1995)
6. Andrew Whittaker, Gary Hart, Christopher Rojahn, “SEISMIC RESPONSE MODIFICATION FACTORS” , JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, 438-444, April. (1999. )
7. KDS 17 10 00 내진설계 일반, 국토교통부
8. ASCE 41-13: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings
9. Karamanos, S.A., Patkas, L.A. and Platyrrachos, M.A. (2006). Sloshing effects on the seismic design of horizontal-cylindrical and spherical industrial vessels. Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 128, No. 3, pp. 328-340, DOI: 10.1115/1.2217965
10. Athol, J.C., “SIMQKE-1” , (2002)
11. Newmark, N. “1982 Newmark Hall EERI Earthquake Spectra and Design 1982” , 6, 42-47, (1982)
12. KDS 24 17 11 교량내진설계기준(한계상태설계법), 국토교통부

# ABSTRACT

Industrial facilities are not only important facilities that contribute significantly to the national economy, but also cause significant secondary damage such as soil, water quality, and air pollution due to fires, explosions, and leaks of harmful substances in the event of damage. Several mechanical facilities and structures are linked to each other to ensure operability in petrochemical plants. Therefore, if any of these facilities are destroyed in the event of an earthquake, operability cannot be secured, which directly or indirectly has a great impact on the national economy.

The current seismic design aims to prevent collapse and is insufficient to secure operability, so performance-based seismic design is required. Therefore, facilities belonging to the same process should secure seismic performance to ensure operability against design earthquakes, and it is desirable to assign different damage levels (seismic performance levels) according to the seismic behavior of the facilities. Performance-based design is a design concept in contrast to the current specification-based design. Specification-based design does not allow other design methods other than prescribed design methods, whereas performance-based design allows any design method if it is verified that it satisfies the required performance.

In this study, seismic behavior characteristics were analyzed through nonlinear dynamic analysis of spherical storage tanks with nonlinear support structures. The nonlinear analysis technique can be applied to the analytical verification method, and the analyzed seismic behavior characteristics are used as basic data for alternative design methods for performance-based design..

The spherical (ball) storage tank is supported by several pillars and braces, showing complex nonlinear behavior during an earthquake due to the buckling and yield of the brace and pillar. In this study, the characteristics of nonlinear behavior were statistically analyzed and a new method of performance-based seismic design was proposed based on this.