



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](#)

공학석사 학위논문

기후변화와 지진에 대응하는
해양자켓구조물의 구조안전성평가

Structural Safety Assessment of Offshore Jacket
Structure for Response to Climate Change and Earthquake



지도교수 송 화 철

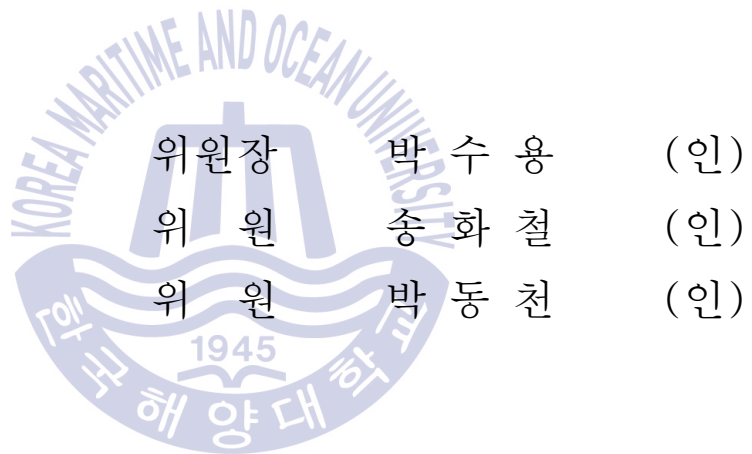
2017년 02월

한국해양대학교 대학원

해양건축공학과

김 형 태

본 논문을 김형태의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2016년 12월 06일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables.....	iii
List of Figures.....	v
Abstract.....	vii

제 1 장 서론.....	1
1.1 연구 배경 및 목적.....	1
1.2 연구 동향.....	5
1.3 연구 범위 및 방법.....	8

제 2 장 해양자켓구조물의 주요 환경하중	10
2.1 개요.....	10
2.2 파랑하중.....	10
2.2.1 파랑이론	10
2.2.2 모리슨 방정식.....	11
2.2.3 파랑의 설계파고.....	12
2.3 지진하중.....	12
2.3.1 개요.....	12
2.3.2 응답스펙트럼.....	13
2.3.3 비선형 지진해석의 원리.....	14

제 3 장 해양자켓구조물의 푸쉬오버해석.....	15
3.1 개요.....	15

3.2	푸시오버해석이론	15
3.3	해양자켓구조물의 위험도 평가방법	17
3.3.1	손상도평가	17
3.3.2	위험도 기반 조사 계획	18
3.4	예제구조물 및 모델링 개요	18
3.4.1	예제구조물 개요	18
3.4.2	모델링 개요	19
3.4.2.1	부재 Group별 제원	20
3.4.2.2	Perform 3-D 부재별 물성치	27
3.5	예제구조물의 풍, 파랑, 조류에 대한 푸시오버해석	29
3.6	예제구조물의 지진하중에 대한 푸시오버해석	30
제 4 장	해양자켓구조물의 비선형 시간이력해석	34
4.1	비선형 시간이력 해석법	34
4.2	모델링 개요	34
4.3	적용 지진파의 종류	36
4.4	자켓구조물의 내진성능평가 방법	37
4.5	예제구조물의 El Centro 지진파에 대한 해석 및 결과	40
4.5.1	기본모델의 해석	40
4.5.2	보강모델의 해석	44
4.5.3	El centro 지진파에 대한 해석결과	48
4.6	예제구조물의 Mexico 지진파에 대한 해석 및 결과	43
4.6.1	기본모델의 해석	48
4.6.2	보강모델의 해석	53
4.6.3	Mexico 지진파에 대한 해석결과	58
4.7	모델링별 지진파에 대한 해석결과	61
제 5 장	결론	61
	참고문헌	63

List of Tables

Table 1	국내 연구 현황	6
Table 2	국외 연구 현황	7
Table 3	파랑의 설계파고 및 주기 (해양연구원, 2007)	12
Table 4	하중조합계수	13
Table 5	손상도 등급	18
Table 6	위험도 기반 검사 주기	18
Table 7	설계파랑	21
Table 8	항력 및 관성력 계수	21
Table 9	조류	21
Table 10	설계풍속	21
Table 11	기본하중	22
Table 12	부재별 강구조 재료기준	22
Table 13	모델링에 적용된 강재의 강도	23
Table 14	하부구조 Group ID와 부재 치수	24
Table 15	하부구조 Group ID 와 부재 치수 - 계속	25
Table 16	하부구조 Group ID와 부재 치수 -계속	26
Table 17	상부구조 Group ID와 부재 치수	26
Table 18	하중조합계수(해양연구원, 2007)	31
Table 19	지진구역계수(해양연구원, 2007)	31
Table 20	구조물 고유주기	36
Table 21	구조물의 내진성능 판정법	38
Table 22	성능수준별 허용층간 변형각(%) - 구조시스템 평가	38
Table 23	철골부재의 허용기준	39
Table 24	층 부재별 허용 층간변형각(θ) - 부재별 평가	39
Table 25	기본모델의 El Centro 지진파 해석결과	40

List of Tables

Table 26	ElCentro지진50%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과	·42
Table 27	ElCentro지진100%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과	·43
Table 28	보강모델의 El Centro 지진과 해석결과	·44
Table 29	ElCentro지진50%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과	·46
Table 30	ElCentro지진100%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과	·47
Table 31	기본모델의 Mexico 지진과 해석결과	·48
Table 32	Mexico지진 50%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과	·51
Table 33	Mexico지진 100%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과	·51
Table 34	Mexico지진 50%에 층 부재별 상세평가 결과	·52
Table 35	Mexico지진 100%에 층 부재별 상세평가 결과	·52
Table 36	보강모델의 Mexico 지진과 해석결과	·53
Table 37	Mexico지진 50%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과	·56
Table 38	Mexico지진 100%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과	·56
Table 39	Mexico지진 50%에 층 부재별 상세평가 결과	·57
Table 40	Mexico지진 100%에 층 부재별 상세평가 결과	·57
Table 41	모델링별 지진하중해석 결과	·60

List of Figures

Fig. 1	평균해수면의 상승	1
Fig. 2	1978~2016년 국내 지진발생 통계자료(기상정보도자료)	2
Fig. 3	1978~2016년 세계 지진발생 통계자료(기상정보도자료)	2
Fig. 4	자켓구조물의 피해사례	3
Fig. 5	자켓구조물의 피해사례	3
Fig. 6	해양플랜트 자켓구조물	4
Fig. 7	해상풍력발전 자켓구조물	5
Fig. 8	연구흐름도	9
Fig. 9	예제구조물 설치 위치	19
Fig. 10	자켓구조물 전체형상	20
Fig. 11	자켓구조물 입면	20
Fig. 12	하부 Beam 물성치	27
Fig. 13	하부 Brace 물성치	28
Fig. 14	하부 Leg 물성치	28
Fig. 15	휨에 대한 Skeleton Curve	29
Fig. 16	축력에 대한 Skeleton Curve	30
Fig. 17	MIDAS 해석결과 0° 방향 성능곡선	30
Fig. 18	Base shear(kN) vs Reference Drift	32
Fig. 19	층별 지진하중에 대한 전단력	33
Fig. 20	자켓구조물 기본모델(좌) 보강모델(우)	35
Fig. 21	El Centro 지진파 Frequency Spectrum	36
Fig. 22	Mexico 지진파 Frequency Spectrum	37
Fig. 23	El Centro 50% 지진파에 대한 층변위와 층하중	40
Fig. 24	El Centro 100% 지진파에 대한 층변위와 층하중	41
Fig. 25	El Centro 50% 지진파에 대한 기본모델 최상층의 변위응답	41

List of Figures

Fig. 26	El Centro 100% 지진파에 대한 기본모델 최상층의 변위응답	42
Fig. 27	El Centro 100% 지진 파괴메커니즘	43
Fig. 28	El Centro 50% 지진파에 대한 층변위와 층하중	44
Fig. 29	El Centro 100% 지진파에 대한 층변위와 층하중	45
Fig. 30	El Centro 50% 지진파에 대한 보강모델 최상층의 변위응답 ..	45
Fig. 31	El Centro 100% 지진파에 대한 보강모델 최상층의 변위응답	46
Fig. 32	El Centro 100% 지진 파괴메커니즘	47
Fig. 33	Mexico 50% 지진파에 대한 층변위와 층하중	49
Fig. 34	Mexico 100% 지진파에 대한 층변위와 층하중	49
Fig. 35	Mexico 50% 지진파에 대한 기본모델 최상층의 변위응답	50
Fig. 36	Mexico 100% 지진파에 대한 기본모델 최상층의 변위응답	50
Fig. 37	Mexico 50% 지진 파괴메커니즘	53
Fig. 38	Mexico 100% 지진 파괴메커니즘	53
Fig. 39	Mexico 50% 지진파에 대한 층변위와 층하중	54
Fig. 40	Mexico 100% 지진파에 대한 층변위와 층하중	54
Fig. 41	Mexico 50% 지진파에 대한 보강모델 최상층의 변위응답	55
Fig. 42	Mexico 100% 지진파에 대한 보강모델 최상층의 변위응답	55
Fig. 43	Mexico 50% 지진 파괴메커니즘	58
Fig. 44	Mexico 100% 지진 파괴메커니즘	58

Structural Safety Assessment of Offshore Jacket Structure for Response to Climate Change and Earthquake

Kim, Hyeong Tae

Department of Ocean Architectural Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The purpose of this study is to present a structural safety assessment of offshore jacket structure against the increasing environmental load. Due to climate change, sea-level rise and strengthening of typhoon power have caused abnormal high-wave phenomenon, and recent earthquake frequency and magnitude are increasing in Korea. Since the offshore jacket structures is generally located in the water space, environmental loads predominate.

The RSR values were derived from the pushover analysis for wind, wave, and tidal load, and the structural safety was evaluated by comparing with the pushover analysis for seismic load. Concluded that the jacket structure is vulnerable to seismic loads and based on this, nonlinear time history analysis was performed.

The results of the nonlinear time history analysis of the jacket structure were evaluated using KBC2016 and Perform 3-D. Based on the results, a weakening part of the jacket structure was found and a reinforcement model was proposed to minimize damage.

The conclusion is as follows

1) The example model of the jacket structure were modeled using the commercial analysis program MIDAS Gen and the earthquake analysis program Perform 3-D, and the safety and behavior were analyzed by performing the pushover analysis and the nonlinear dynamic analysis.

2) As a result of the pushover analysis, the structure was stable for wind, wave, and algae, and the RSR value was 2.56, indicating that the degree of damage was “middle” , However, as a result of the pushover analysis for the seismic load, the leg structure collapsed due to the heavy load on the upper structure, and the weak behavior against the earthquake load was show, and. the RSR value was 1.633, indicating that the degree of damage was “high” .

3) The results of the nonlinear dynamic analysis show that the El Centro earthquake has a stable behavior but the Mexico earthquake has resonance and it is very weak. The structure does not cause the whole plastic behavior and stress concentration phenomenon, and some member local failure mechanism occurred.

4) In order to investigate the plastic behavior of the model against the seismic waves of Mexico, Brace reinforced model was analyzed. As a result, plastic deformation occurred at 50% of the Mexico earthquake acceleration but the seismic performance was IO grade.

5) Through the seismic analysis, it can be seen that the example structure is vulnerable to the long-period wave, and it is desirable to reinforce it with brace to secure the safety of the structure.

KEY WORDS: Offshore jacket structure, Nonlinear analysis, Safety assessment, Pushover analysis, Earthquake load, Wave load

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

기후는 장기간의 평균 상태를 의미하는 것으로 기후변화는 평균 상태의 변화를 의미한다. 이러한 변화는 지구 외적인 요인에 의해서 일어나기도 하고, 지구를 둘러싸고 있는 대기 조성의 변화나 지구 표면 상태의 변화 등에 의해서 일어날 수 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)는 2007년 4차 기후변화 평가보고서를 통해 “기후 시스템의 온난화는 지구 평균기온과 해수 온도 상승, 광범위한 눈과 얼음의 용해, 평균해수면 상승 등의 관측 자료를 통해 명백히 나타난다.”라고 밝혔다. 또한 '지구온난화' 진행속도는 2001년 발표된 3차 보고서의 예측치를 넘어 예상보다 빠르게 진행되고 있다고 경고했다(박종숙 외 3명, 2013)(Fig. 1).

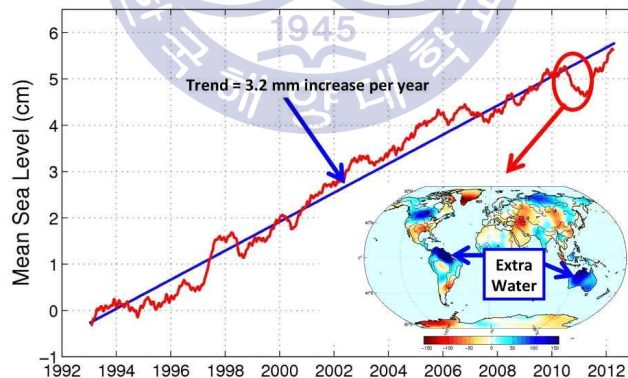


Fig. 1 평균해수면의 상승

또한, 해수면의 증가와 더불어 환경하중의 하나인 지진 하중의 발생 또한 Fig. 2,3과 같이 세계적으로도 증가하고 있는 상황이며 최근 국내에서 발생한 경주의 5.8규모의 지진으로 한반도는 더 이상 지진의 안전지대가 아님을 알 수

있었다. 따라서 지진하중에 대한 대비가 필요하고 이는 지중에 있는 구조물뿐만 아니라 해상의 구조물에 대해서도 고려되어야 하는 상황이다.

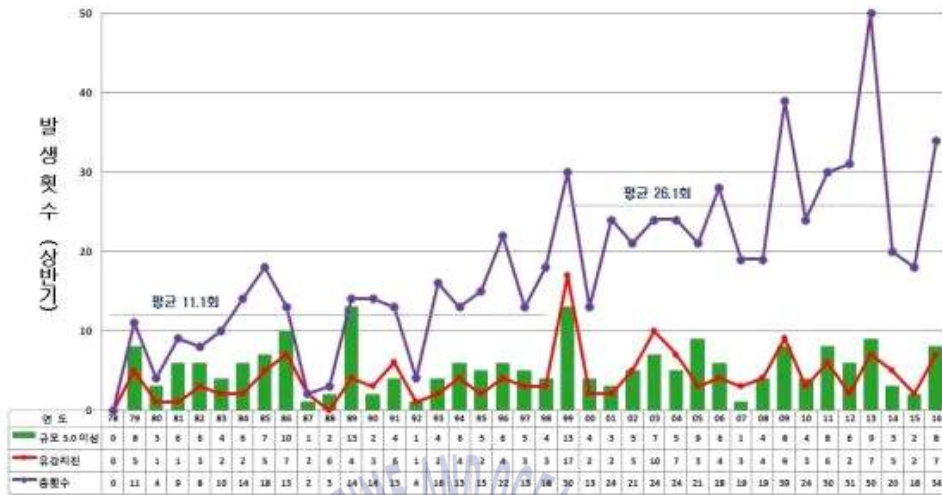


Fig. 2 1978~2016년 국내 지진발생 통계자료(기상정보도자료)



Fig. 3 1978~2016년 세계 지진발생 통계자료(기상정보도자료)

해양구조물의 사고의 대부분은 잠재적인 인적오류 또는 조직적 오류 또는 기
자재 오작동 및 고장 등에 기인한 사고가 대부분이며, 이러한 요인들이 복합적

으로 작용해서 발생한 사고가 대부분이고, 사고가 발생하게 되면 인적, 물적 피해와 더불어 큰 규모의 환경오염을 동반하기 때문에 구조물의 안전성 확보가 사고유발 원인을 줄이는 중요한 요인이다. 또한 해양플랜트의 증가로 해양구조물의 사고가 새로운 해양사고의 분류로 보고되고 있다.(Fig. 4,5)



Fig. 4 자켓구조물의 피해사례



Fig. 5 자켓구조물의 피해사례

그러므로 기후변화에 따른 해수면상승과 강진 등 환경하중의 증가로 인한 해양구조물의 피해를 최소화하기 위한 대책이 필요하고 이를 체계적으로 관리하기 위한 구조안전성 평가방법이 필요한 실정이다. 국내의 시장 동향을 봤을 때 해양플랜트와 해상풍력발전의 시장 확대로 고정식 해양자켓구조물의 수요가 증

가할 것으로 예측되고 있으며 엔지니어링 설계 기술과 첨단 구조안전진단 및 유지관리 기술의 자립화가 요구되고 있다.(Fig. 6, 7)

국외의 경우 해양플랜트 운영·서비스분야 요소기술인 고정식 해양플랫폼의 위험도평가와 구조건전성관리(Structural Integrity Management) 기법을 자켓플랫폼 구조부재의 안전진단주기 계획에 활용하고 있는 실정이다. 그러나 국내에서는 고정식 해양구조물에 대하여 정기, 연차 개조검사 등에 대한 개략적인 사항만 명시되어 있어 구조물의 정확한 평가를 통한 안전진단주기 계획 등이 수립될 수 있도록 국내에서도 위험도평가에 관한 기법과 연구개발이 필요하다.(한국선급, 2013)

따라서 본 논문에서는 백령도 인근의 서해해양과학기지를 예제로 환경하중의 증가를 고려한 풍, 파랑, 조류, 지진하중에 대한 pushover해석과 강진에 대한 비선형 동적해석을 통해 해양구조물의 구조안전성 평가를 실시하고자 한다.

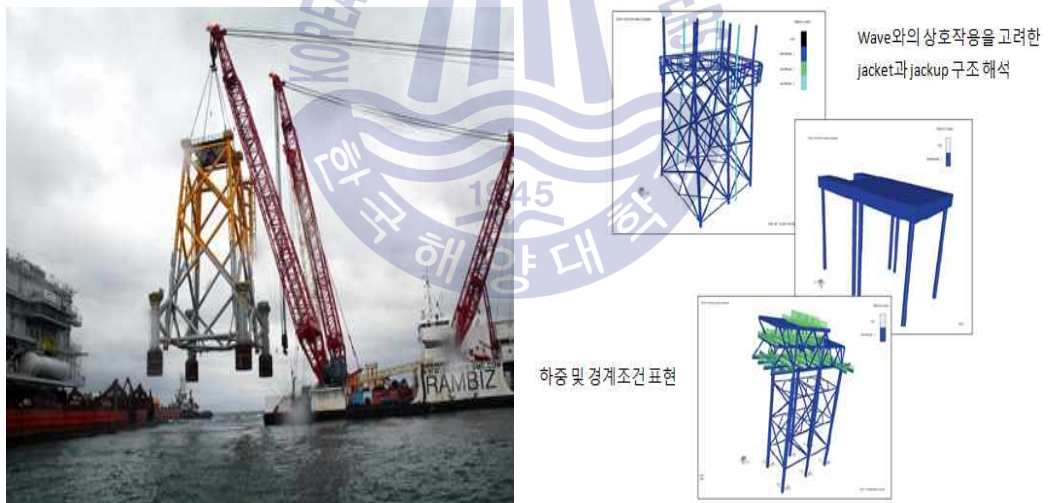


Fig. 6 해양플랜트 자켓구조물

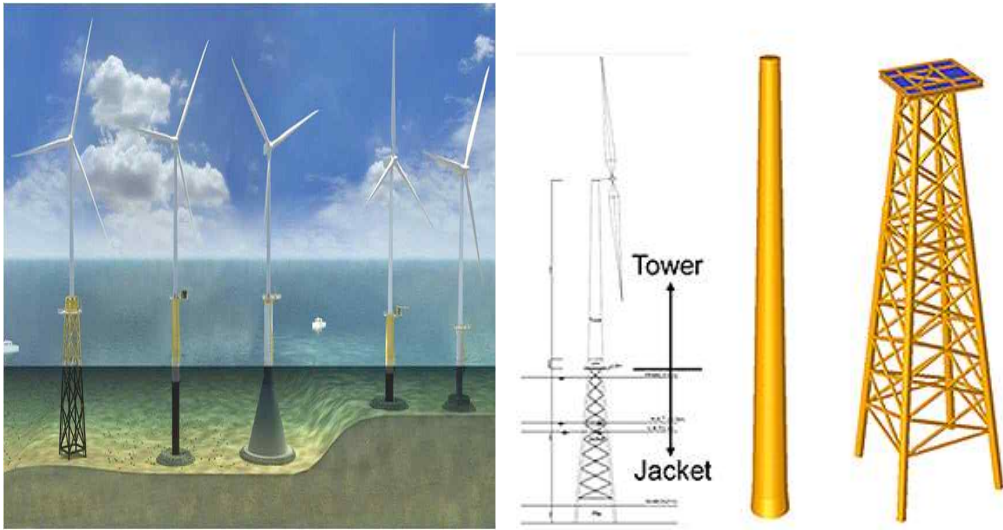


Fig. 7 해상풍력발전 자켓구조물

1.2 연구 동향

국내 해양구조물의 안전성평가에 관한 연구는 해양구조물 피로에 대해 확률론적으로 안정성을 평가하는 기법을 개발하기 위한 해양구조물의 피로수명예측에 대한 신뢰성해석(이재욱 외 3명, 1998)과 불확실성 모델링을 포함한 저온해역에서의 해양구조물에 대한 구조 신뢰성 해석(이주성, 1997)에 관한 연구가 수행되었다. 한국선급협회에서 발생한 고정식 해양구조물 규칙(한국선급, 2013개정)에 고정식 해양구조물의 설계, 제조, 설치 및 검사에 대한 내용이 있다.

이 규칙에서는 설계수명동안 5년 이내 주기로 정기적 검사를 제안하고 있으며, 해수면 상부 및 해수면 인접부위에 대한 부식 및 침식이 발견될 경우 수중하부의 전반적인 검사를 추천하고 있다. 이처럼 해양플랜트 안전성평가의 주요 기술인 위험도 평가(Risk Assessment)에 관한 국내 기술 및 규준은 체계적이지 않으며 국외에 비하여 차이가 난다.(Table 1)

Table 1 국내 연구 현황

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용 현황
울산대학교 (1997년)	<ul style="list-style-type: none"> - 저온해역에서의 해양구조물에 대한 구조 신뢰성 해석 - 사할린해역을 대상으로 구조물설계 - 신뢰성해석을 위한 불확실성 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> - TLP 구조에 대한 설계결과를 실제 설계단계에서 Proto-model 로 활용
충남대학교 (1998년)	<ul style="list-style-type: none"> - 고정식 해양구조물의 피로수명 예측에 대한 신뢰성해석 - 해양구조물 피로에 대해 확률론적으로 안정성을 평가하는 기법 개발 - 유의파고와 평균주기, 파주기에 대한 확률 분포함수 검토 	<ul style="list-style-type: none"> - 고정식 해양구조물 설계 시 피로신뢰성해석 모델을 활용
한국해양대학교 (2014년)	<p>자켓구조물의 비선형 푸쉬오버해석 파랑하중의 변동성을 고려한 신뢰성해석 구조물손상도 평가 및 위험도매트릭스 제안</p>	<p>파랑하중의 변동성을 고려한 자켓구조물 위험도평가 활용</p>

국외의 경우 고정식 해양플랫폼의 위험도평가와 구조건전성관리(Structural Integrity Management)에 관한 연구를 통하여 자켓플랫폼 구조부재의 안전진단 주기 계획에 활용하고 있다. 자켓플랫폼의 피로파괴해석을 통한 위험도기반 진단계획에 관한 연구를 통하여 위험도 매트릭스(Risk Matrix)작성 및 위험도기반 진단계획(Risk-based Inspection Plan)에 활용하고 있다.(Table 2)

Table 2 국외 연구 현황

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용 현황
중국 대련대학교 (2014년)	<ul style="list-style-type: none"> - 동적파괴 메커니즘 해석을 이용한 자켓플랫폼의 구조안전성 - 자켓플랫폼 구조물의 모달 해석 및 파괴 저항 해석 - 파괴한계에 대한 소성상태 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - 지진하중에 대한 자켓구조물 파괴분석 및 내진 설계에 활용
중국 하얼빈대학교 (2014년)	<ul style="list-style-type: none"> - 자켓플랫폼의 피로파괴해석을 통한 위험도기반 진단계획 - 위험도기반 구조안전성평가를 위한 파괴 과정 해석 개발 - 위험도매트릭스 작성 및 위험도기반 진단계획 제안 	<ul style="list-style-type: none"> - 자켓플랫폼 구조부재의 안전 진단주기 계획에 활용
말레이시아 페트로나스 기술대학 (2009년)	<ul style="list-style-type: none"> - 고정식 해양플랫폼의 구조건 전성 관리 (Structural Integrity Management) - API, ISO 구조건전성관리 분석 - 말레이시아 해양플랫폼 위험도평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 자켓구조물 위험도평가 및 안전진단 계획에 활용
API(2014)	<ul style="list-style-type: none"> - 구조건전성관리 - Likelihood of Failure와 Consequence of Failure의 조합으로 작성으로 위험도 매트릭스 작성 	<ul style="list-style-type: none"> - 자켓구조물 위험도평가 및 안전진단 계획에 활용
DVN(1995)	<ul style="list-style-type: none"> - 환경적, 재료적 불확실성에 대하여 신뢰성 해석 - 구조부재의 중요도에 따른 목표 확률 분류 	<ul style="list-style-type: none"> - 자켓 구조물의 극한상황을 고려한 설계 및 평가에 활용
이란 K.N. Toosi 공대 (2015)	<p>정적 푸쉬오버해석 및 동적해석에 의한 자켓플랫폼의 내진성능평가 기존 자켓플랫폼의 내진성능평가를 위한 간편해석법 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 강진지역 자켓구조물의 내진성능평가에 활용

1.3 연구 범위 및 방법

본 논문에서는 증가하는 환경하중에 대응하는 자켓구조물의 구조 안정성을 평가하기 위해서 극한 하중이 발생할 때, 자켓구조물의 안전성을 pushover해석과 비선형 시간이력해석을 통하여 알아보고자 한다.

각각의 해석은 서해 백령도에 건설예정인 해양과학기지에 대하여 수행되었으며 pushover해석의 경우 파고의 변동을 변수로 하여 수행하였고 비선형 시간이력해석에서는 지진파의 가속도 값을 변수로 하여 수행되었다.

pushover해석은 국내해석프로그램인 Midas사의 Gen과 Perform 3-D로 예제구조물을 모델링하고 해석을 수행하였으며 RSR값을 구하고 손상도 등급으로 구조안전성을 평가 하였다.

비선형 시간이력 해석을 지진해석 프로그램인 Perform 3-D를 이용하여 예제구조물을 모델링 하고 해석을 수행하였으며 지진하중에 대한 변위와 부재의 국부파괴를 확인하고 구조안전성을 평가 하였다.

본 논문의 내용을 정리하면 다음과 같다.

제 1 장에서는 기후변화에 대응하는 자켓구조물의 구조안전성 평가의 연구배경 및 목적과 국내외 연구동향 및 본 논문의 연구 방향을 제시하였다.

제 2 장에서는 자켓구조물의 구조안전성 평가를 위해 해상구조물에 작용하는 주요환경하중에 대하여 기술하였다.

제 3 장에서는 pushover해석에 대한 이론과 예제구조물을 Midas를 이용해 변동계수에 따른 비선형 pushover해석을 실시하고, 그 결과를 RSR값으로 나타내고 손상도 등급으로 자켓구조물의 안전성평가를 하였다.

제 4 장에서는 비선형 시간이력해석에 대한 이론과 3장에서 실시한 동일한 예제 구조물을 Perform3-D를 이용해 해석을 실시하고, 그 결과를 국토해양부, 한국시설안전공단의 기존 시설물 내진성능 평가요령(KBC2016적용)에 따라 자켓구조물의 구조안전성을 평가 하였다.

제 5 장에서는 본 연구를 통해서 얻은 결론을 서술한다.

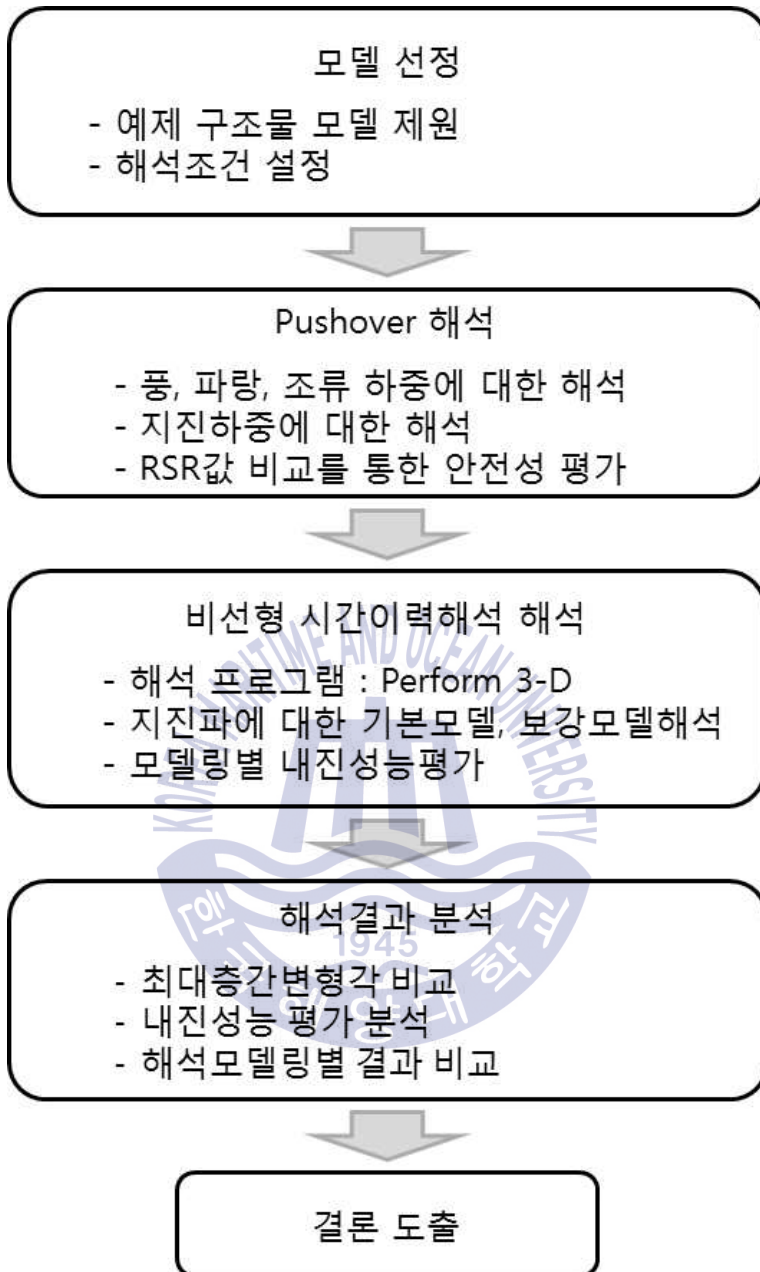


Fig. 8 연구흐름도

제 2 장 해양자켓구조물에 작용하는 주요 환경하중

2.1 개요

해양구조물의 강도에 영향을 주는 외부환경 상태로는 외부수압(hydrostatic pressure), 바람(wind), 파도(wave), 해류(current), 조수(tide),빙하(ice), 지진(earthquake), 온도(temperature), 세굴(souring) 등을 생각할 수 있으며, 이에 따른 하중을 환경하중이라고 부른다. Offshore platform에 작용하는 하중에는 gravity load, buoyancy load, wind load, current load, wave load, flow load 및 충격 하중 등이 있다.

2.2 파랑하중

해양구조물에 작용하는 외부하중 중 가장 영향이 크고 설계에 지배적인 것이 파랑하중이라는 것은 주지의 사실이다. 파랑이란 해수면이 주기적으로 진동하는 현상을 말하며 실제로는 매우 복잡하고 무작위한 경향을 갖기 때문에 이를 수학적으로 정확하게 표현, 해석하기란 사실상 불가능 하다고 할 수 있으나 이에 대한 실험과 연구가 현재 상당한 진척을 보이고 있다.

해양에서 파랑이 생기는 일차적이고 가장 큰 요인은 바람의 Friction Force에 있으나 가끔 해저지진이나 지각변동, 해저화산폭발, 기압의 변동, 조류 등에 의해서 생기기도 하며 이때의 파랑은 바람으로 인한 파도보다 보통 더 긴 주기를 갖는다.(신상학, 2008)

2.2.1 파랑 이론

파랑이론에는 Airy, Stoke, Stream Function, Cnoidal, Solitary WaveTheory 등이 있으며, 이러한 파랑이론의 특성들이 각각 다르기 때문에 실제 파랑의 특성

과 잘 일치하는 파랑이론을 선택하는 것이 중요하다. 수심을 d , 설계파의 파장을 L 이라 하였을 때, $d/L > 0.5$ 인 심해(deep sea)에서는 Airy wave나 Stoke wave theory를 $d/L > 0.04$ 인 천해(shallow sea)에서는 Cnoidal이나 Solitary wave theory를 쓰는 것을 추천한다. 파력을 계산하려면 먼저 주어진 design wave condition을 가장 잘 만족하는 wave theory를 선택하여 여러 wave parameter를 결정한 다음 실제와 이론을 최대한 만족시킬 수 있는 계수를 고려하여 Morison Equation 식(1)로부터 구하게 된다.(신상학, 2008)

2.2.2 모리슨 방정식

$$F = F_d + F_i = \frac{1}{2} \rho C_d A u^2 + \rho C_m v \frac{du}{dt} \quad (1)$$

여기서 F_d : Drag Force

F_i : Inertia Force

C_m : Inertia 계수

C_d : Drag 계수

A: 단위 면적

U : 물입자 속도

여기서 Drag Force는 유체가 물체 주위를 흐를 때 생기는 마찰력과 물체의 후면에서 유체 흐름이 분리되어 부서짐으로서 생기는 유체방향의 압력이 그 주 원인이며 Inertia Force는 유체중의 물 분자가 가속도를 갖기 때문에 발생한다. 일반적으로 자켓구조물과 같이 파이프로 구성되어 있는 구조물들은 Drag Force가 Inertia Force에 비해 크게 작용하기 때문에 Drag-Dominant Structure라 하며 Gravity Structure처럼 지름이 큰 구조물은 그 반대로 Inertia-Dominant Structure라 할 수 있다.

2.2.3 파랑의 설계파고

설계파고는 재현기간 1년이 평시운전 조건인 경우와 재현기간 50년인 극한조건시인 경우에 대하여 1979년~2003년 동안 관측된 자료로부터 산정한다.

관측된 자료로는 1년 Short term 통계치 이므로 설계파고 산정시 유의파고에 1.83배하여 산정하였으며 주기는 거의 유사하다고 판단하고 유의주기를 그대로 적용한다.(Table 3)

Table 3 파랑의 설계파고 및 주기 (해양연구원, 2007)

운전조건		재현기간	유의 파랑	적용 설계파
평시운전조건	파고(m)	1년	4.33m	7.92m
	주기(sec)	1년	8.87sec	8.87sec
극한조건	파고(m)	50년	7.56m	13.83m
	주기(sec)	50년	12.35sec	12.35sec

2.3 지진하중

2.3.1 개요

우리나라에서는 지진피해에 대하여 별로 관심을 갖지 못하였으나, 멕시코, 이란 등의 대형 지진피해와 1978년 홍성지진 이후 관심이 증대되어서 국내에서도 1988년 1월부터 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙에 내진설계를 하도록 정하고 있고 최근 경주에서 발생한 5.8규모의 지진으로 내진설계와 안전에 관한 관심이 급증하고 있다.

지진하중은 구조물을 지지하는 지면의 수평방향 및 수직방향 운동 특히 수평 가속도에 의해 발생된다. 기초와 일체로 연결된 고정식구조물인 경우 지면의 운동은 구조물에 관성력을 일으키며, 그 값은 어느 순간의 지면 가속도와 구조물의 질량의 곱으로 나타내진다.

고정식 해양과 같은 수중 구조물에 설계지진과 설계파가 동시에 발생할 확률은 매우 작으므로 설계지진은 해석 시 파랑의 작용을 무시한다. 주위의 유체에

대한 구조물의 상대속도가 충분히 작아서 유체를 Incompressible, In-viscid, Irrational하다고 가정하여 유동의 관성력 영향을 부가질량(Added Mass)으로 포함하고, 점성력의 영향은 감쇠계수를 적절히 증가시켜 나타내어진 구조물이 대기 중에 서있는 것으로 간주하여 해석한다.

예제구조물에 대한 내진설계는 API RP2A의 Dynamic Response Procedure에 따르며 응답스펙트럼은 항만설계 기준을 적용한다. 본 논문에서는 내진성능 기준을 기능수행 수준과 붕괴방지 수준으로 구분하여 평가하였으며, 기능수행수준이란 이 지역의 지진 가속도 계수에 항만설계기준에 해당하는 0.57배를 사용한 것이며, 붕괴방지 수준은 1.40배를 적용한 것이다.(해양연구원, 2007)

따라서 적용된 지진 가속도는 다음 Table 4 와 같다.

Table 4 하중조합계수

내진성능기준	지진구역계수 (II 구역)	위험도 계수 (I 등급)	적용가속도	적 용
기능수행수준	0.11g	0.57	0.063g	보조부재 검토
붕괴방지구준		1.40	0.154g	주 부재 및 구조시스템 검토

2.3.2 응답스펙트럼

응답 스펙트럼 해석은 항만설계기준의 표준 응답 스펙트럼을 사용한다.

모드 응답합성에는 CQC(Complete Quadratic Combination)법을 적용하고, 방향별 응답 합성에는 합성된 가속도 스펙트럼을 부재의 x, y, z 방향별로 각각 100%, 100%, 50%를 동시에 적용하여 응력을 계산한다.

구조물의 진동 특성을 해석할 때, 감쇠계수(Damping Ratio)는 API-RP-2A에 따라 예제 구조물에 대하여 5%를 적용하였으며, 지진 하중에 대하여서는 구조물의 허용 응력을 API-RP-2A에 따라 70% 증가시킨다.(해양연구원, 2007)

2.3.3 비선형 지진해석의 원리

지진하중을 받는 구조물의 지진응답과 내진성능을 정확하게 평가하기 위해서는 연성요구도의 산정과 구조물의 연성도 능력에 대한 예측이 매우 중요하다. 구조물의 연성도 능력은 구조부재에 대하여 실험적으로 평가되지만 연성 요구도는 구조물의 비탄성 지진해석에 의하여 산정될 수 있다.

비선형 구조거동은 구조재의 역학적 저항능력이 선형한계를 넘는 재료적 비선형문제와 큰 변형에 의한 기하학적 비선형문제로 구별할 수 있다. 비선형 지진해석에 의한 연성 요구도를 평가하는 방법으로는 비선형 정적해석과 비선형 시간영역해석이 있다(최한식 외3인, 2005).

비선형 정적해석은 일반적으로 Pushover 해석으로 불리며 구조물의 비선형적 특성값 또는 부재 거동의 기하학적 비선형성 등으로 모델링 한 후 정적증분하중에 따라 해석을 실시하는 방법으로 해석시간을 단축시키고 해석 결과값을 쉽게 얻을 수 있으나 정적해석에 기반을 두고 있는 해석법이고 구조물의 실질적 거동을 묘사하지 못한다는 단점이 있다.

비선형 시간이력 해석은 부재 및 재료의 비선형적 특성값과 시간의존적인 특성을 반영하여 구조물의 변위, 속도, 가속도 등을 시간에 따른 이력으로 구할 수 있는 가장 정확한 해석법으로 신뢰성이 가장 높은 방법이다.

제 3 장 해양자켓구조물의 푸쉬오버해석

3.1 개요

구조물이 항복한 이후의 동적거동과 하중의 재분배를 고려한 시스템의 안정한계상태를 효과적으로 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 해석방법으로서 일명 “Pushover 해석” 이라고 한다.

비선형 정적해석을 이용하여 구조물의 저항능력을 산정하고 요구되는 지진하중의 수준과 직접 비교함으로써 비선형 지진응답과 내진성능을 매우 효과적으로 평가할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이다. 즉, 지진하중을 받는 구조물이 안전하게 저항하기 위해서는 적절한 강도와 연성을 확보해야 한다는 지진방정식 “능력(capacity) > 요구(demand)” 를 가장 효과적으로 파악할 수 있는 해석적 방법이라고 할 수 있다.(최한식 외3인, 2005)

Pushover 해석은 구조물의 응답상태를 제어하는 방식에 따라 하중제어(load control)방법과 변위제어(displacement control)방법이 있다. 하중제어는 구조물에서 발생하는 내력한계를 미리 가정하고 하중증분법을 이용하여 힘과 변위관계를 파악하는 것이며, 변위제어는 구조물에서 예상되는 목표변위를 가정하고 설정된 목표변위를 달성할 수 있도록 단계별 변위를 제어함으로써 힘과 변위관계에 대한 거동을 파악하는 것이다.

3.2 푸쉬오버해석 이론

Pushover 해석은 층에 한 방향으로 하중을 분포시키고 이 하중을 점차 증가시키는 방법으로 구조물의 비탄성 거동을 관찰하게 된다. Pushover 해석법은 구조물이 항복한 이후의 동적 거동과 하중의 재분배를 고려한 시스템의 안정한계 상태를 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 방법이다.

이러한 장점으로 인하여 널리 사용되고 있지만 해석 시에 횡하중 분배방법의 변화에 따라 보유성능은 큰 차이를 나타 낼 수 있다.

Pushover 해석은 고차모드 영향의 반영 여부에 따라서 두 가지로 분류된다. 고차모드의 영향이 반영되지 않은 방법은 건물의 높이에 분포되는 횡하중을 결정한다. 이때, 횡하중의 분포를 결정하는 방법은 탄성해석에 의한 1차 모드의 형상에 따르거나 코드에서 제시하는 층 지진하중에 의해 결정하는 방법이 일반적이다. 또한 고차모드의 영향이 반영된 pushover 해석방법이 몇 가지 제시되고 있다.

고차모드의 영향이 반영된 pushover 해석법에는 일단 모드별로 해석을 수행한 후에 그 결과를 조합하는 방법과 횡하중 분배계수를 산정할 때 고차모드를 반영하여 pushover 해석을 수행하는 방법이 있다.

이 두 가지 방법은 모두 과거의 지진을 사용하여 각 모드의 영향을 반영하게 된다. 하지만 이때에 사용되는 지진은 과거의 실제 지진으로 그 지역에서 발생할 미래의 지진을 예견할 수 있는 대표지진이라 할 수 없다. 또한 각 방법별 단점을 살펴보면, 모드별로 해석을 수행한 후에 원하는 결과들(층간 변위비, 층 지진하중, 수성 분포 등)을 조합하는 방법은 복잡한 비선형 해석을 원하는 모드의 수만큼 수행하여야 하고 그 값들을 조합하는 방법 또한 명확하지가 않고 또한 그 조합된 값의 정확도 또한 고차모드의 영향이 반영된 다른 방법에 비해 월등하다고 판단 할 수가 없다.

두 번째 방법인 횡하중 분배계수를 산정할 때 고차모드를 반영하는 방법도 다소 복잡한 과정을 거쳐서 횡하중 분배계수를 산정하여 pushover 해석을 수행한다. 그리고 전자의 방법과 마찬가지로 결과의 정확성이 월등하지 못하다.

하지만 모드별로 해석을 수행한 후에 그 결과를 조합하는 방법에 비해 고차모드의 영향이 반영된 횡하중 분배계수를 산정하는 방법은 복잡한 비선형 해석을 한 번만 수행해도 된다는 장점을 지니고 있다(김건우, 2005).

3.3 해양 자켓 구조물의 위험도 평가 방법

3.3.1 손상도 평가

구조물이 파괴되는 조건은 구조물에 작용하는 외력이 구조물이 저항할 수 있는 내력을 초과할 경우 발생한다. 때문에 구조물을 설계할 때에는 구조물의 내구연한동안 구조물에 영향을 미치는 모든 외력조건에 의한 외력보다 큰 내력을 가질 수 있는 구조물이 되도록 하여야 한다.

해양구조물에 발생하는 외력의 경우 구조물의 수직방향으로 작용하는 자중, 활하중 및 부력이 있으며, 수평방향으로 작용하는 환경하중(파랑, 조류, 풍)이 있다. 통상적으로 구조기준에 맞게 설계된 구조물은 작용하는 외력보가 큰 내력을 가지고 있으며 이러한 내력의 여유치를 안전율이라고 한다. 그런데 모든 구조물이 같은 안전율을 가지는 것이 아니라 경제적인 설계를 목적으로 다양한 안전율을 가지며 이는 구조물의 안전도와도 밀접한 관계가 있으며, 구조물의 관리에도 영향을 준다(산학협력 선도대학(LINC) 육성사업, “기후변화에 대응하는 해양자켓구조물의 위험도 평가에 관한 연구”, 최종보고서, 2015).

구조물의 안전율이 높으면 여유치가 많으며, 그만큼 구조물이 튼튼하기 때문에 구조물의 점검 주기가 길어질 수 있다. 따라서 구조물의 외력에 대한 여유치가 어느 정도인지를 산술적으로 표현할 필요가 있다. 이러한 여유값은 구조물의 여유강도비(Reserve Strength Ratio)(이후RSR)로 나타낼 수 있으며 RSR은 식 (2)와 같이 설계강도에 대한 극한강도의 비로 산정한다.

구조물의 손상도는 비선형 pushover 해석을 수행하여 평가할 수 있다. 해석 과정은 구조물의 재료비선형 특성을 적용하여 하중증분법 또는 변위증분법을 통해 전체 구조물의 극한지지력을 산정하고 공칭설계하중에 대한 극한 수평 저항력의 비인 여유강도비(RSR)로 산정한다. RSR에 따라 3등급으로 구분할 수 있으며 Table 5와 같다(CNOOC,2000).

$$RSR = \frac{\text{Ultimate Collapse Load}}{\text{Design Load}} \quad (2)$$

Table 5 손상도 등급

범위	등급
$RSR < 2.0$	High
$2.0 \leq RSR < 2.6$	Middle
$2.6 \leq RSR$	Low

3.3.2 위험도 기반 조사 계획

위험도기반 구조평가의 결과를 참고하여 위험도가 높을수록 점검주기를 줄이고 보다 상세히 검사계획을 수립할 수 있다. 소성해석 결과를 이용하여 파괴 예상부위에 대한 검사 범위 선정 및 효율적인 점검주기를 결정하는데 도움을 준다. 이에 대하여 API(2008)에서 권장하는 점검주기는 Table 6과 같다.

Table 6 위험도 기반 검사 주기

위험도 등급	검사 주기
High	3~5년
Middle	6~10년
Low	11년 이상

3.4 예제구조물 및 모델링 개요

3.4.1 예제구조물 개요

본 연구에서 고려한 해양구조물은 2015년 완공을 목표로 2007년도에 구조 설계된 백령도 해양과학기지의 하부구조물이다. 구조물의 설치 예정 위치는 Fig.

9와 같이 서해도 상에 위치하고 있다.

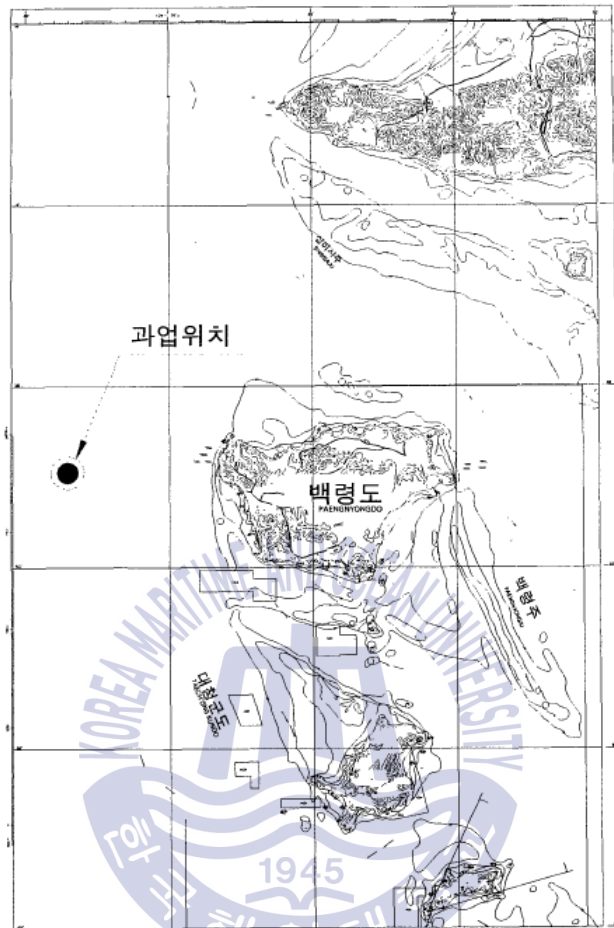


Fig. 9 예제구조물 설치 위치

예제구조물은 일반적인 자켓 형태의 구조물이 아닌 변형된 타워 형태의 구조물이다. 구조물의 형태가 서로 조금 다르지만 외력에 의해 발생하는 내부응력의 발생형태나 구조물의 거동이 비슷하기 때문에 위험도 평가에는 많은 영향을 미치지 않는다. 구조물은 4개의 Skirt pile과 Leg, Diagonal Brace로 지지되는 형태이며, 수심 70m에 설치된다. 구조물의 형상은 Fig 10,11과 같다.(해양수산부, 2007)

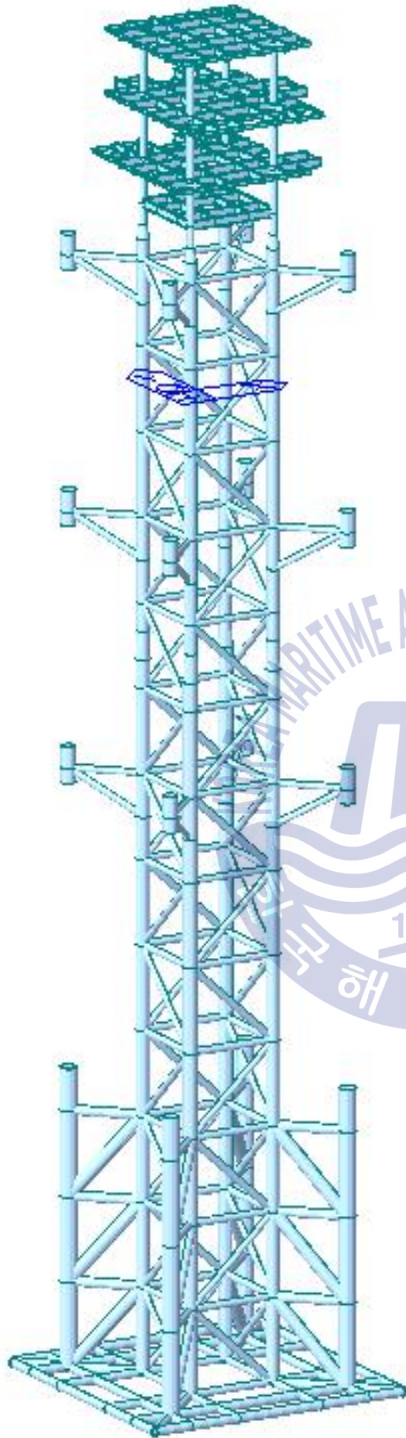


Fig. 10 자켓구조물 전체형상

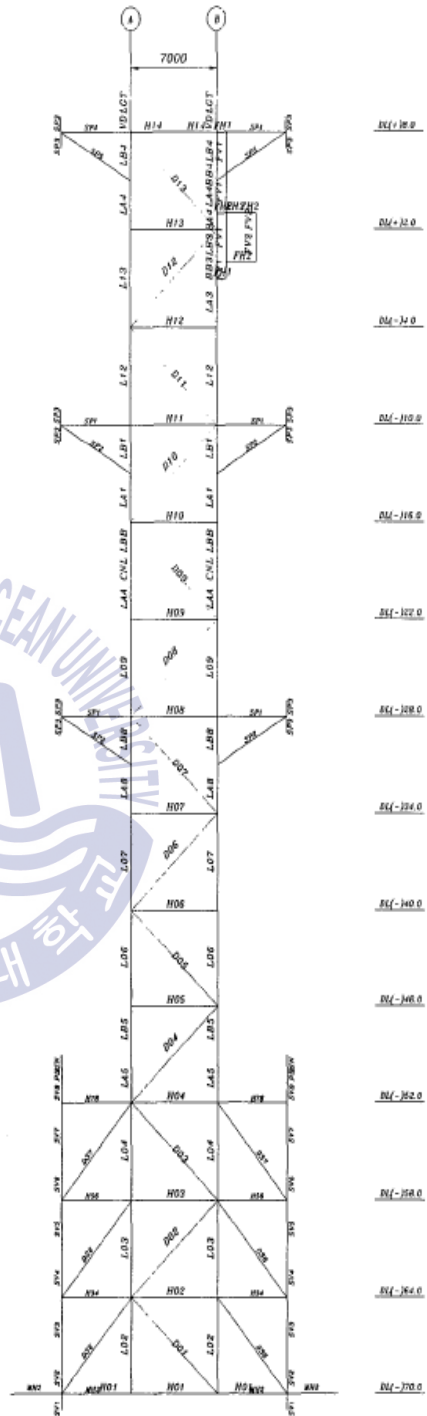


Fig. 11 자켓구조물 입면

3.4.2 모델링 개요

구조물의 설계에 적용된 환경하중정보는 파랑(Table 7,8), 조류(Table 9), 및 바람(Table 10)과 같이 적용되었다. 파랑하중의 파랑운동계수(kinematics Factor)는 1.0을 적용하였다. 또한 모델링에 적용된 기본하중은 Table 11과 같다.

Table 7 설계파랑

운전조건		재현기간	유의파랑	설계파
평시조건	파고(m)	1년	4.33m	7.92m
	주기(sec)	1년	8.87sec	8.87sec
극한조건	파고(m)	50년	7.56m	13.83m
	주기(sec)	50년	12.35sec	12.35sec

Table 8 항력 및 관성력 계수

표면의 성질	항력계수 (Cd)	관성력계수 (Cm)	Remark
부드러운 표면 (DL+0.0이상)	0.65	1.60	API-RP-2A
거친 표면 (DL+0.0이하)	1.05	1.20	

Table 9 조류

수심	설계조류속
0~70m	0~2.211m/s

Table 10 설계풍속

설계조건	재현기간	지속시간	설계풍속
평시조건	1년	1분	9.9m/s
극한조건	50년	1분	30.1m/s

Table 11 기본하중

Load Case	하중종류	적용하중
Load Case 1	사하중	8505.874 kN
Load Case 2	부속물하중	1160.454 kN
Load Case 3	장비하중	236.330 kN
Load Case 4	건물하중	132.071 kN
Load Case 5	장비 운영하중- 장비 순하중	210.896 kN
Load Case 6	활하중	4576.842 kN
Total		14822.47 kN

3.4.2.1 부재 위치별 제원

다음은 모델링에 적용한 부재의 Group ID와 부재치수를 나타낸다. (해수부, 서해 해양과학기지 구축(설계) 보고서 참조)

Table 12 부재별 강구조 재료기준

구 분	ASTM or Standards	
	Mild Steel	High Strength Steel
Deck Plate, Beams, Angles, Channels, Tees, and Misc, shapes cut form plate	ASTM A36 SWS 400	
Deck Columns	ASTM A36 API 5L Gr.B	API 2h Gr. 42 ASTM A537 Class 1
Piles & Skirt Pile Sleeves	ASTM A36	API 5L Gr. 50
Jacket Leg Sections	ASTM A36	API 2H Gr.42
Padeyes	ASTM A36	API 2H Gr. 42 or 50

Table 13 모델링에 적용된 강재의 강도

Group	Steel Specification		Minimum Yield		Tensile Range	
			Point/Strength		Ksi	MPa
			Ksi	MPa		
I	ASTM		36	250	58~80	400~550
	API 5L	Grade B	35	240	60~	415~
	ASTM A106	Grade B	35	240	60~	415~
	ASTM A131	Grade A, B, CS, D, DS, E	34	235	58~71	400~490
	SWS 400		35	245	58~80	410~550
II	ASTM A588	(5" and under)	50	345	70~	485~
	API 2H	Grade 42	42	290	62~80	430~550
		Grade 50	50	360	70~	485~
	API 5L	Grade X52	52	360	66~72	495~555
III	ASTM A572	Grade 60	60	415	75~	515~

부재의 물성치는 ZenScad 프로그램의 “SECT” 카드에서 입력된 데이터로 단면의 성질(Sectional Properties)을 자동적으로 계산한다. 단 프로그램 내에서 자동으로 계산되어지지 않는 3중 복합단면은 AISC에서 추천하는 다음 식으로부터 유효두께를 산정하여 적용하였다.

$$t_{eff} = \sqrt{\frac{(t_1^3 + t_2^3)}{t_1}}$$

여기서, t_1 = 외측 관의 두께

t_2 = 내측 관의 두께

Table 14 하부구조 Group ID와 부재 치수

Group	Sect	Type	O.D	Thick	Pile	Eff.Wt	Materail Type	비고
L02	L0CAN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	Jacket (Leg)
L02	L0MAIN	TUB	1073	25			ASTM A36	
L02	L0CAN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
L03	L0CAN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
L03	L0MAIN	TUB	1073	25			ASTM A36	
L03	L0CAN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
L04	L1MAIN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
L04	L1MAIN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
LA5	L1MAIN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
LB5	L1MAIN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
L06	L1MAIN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
L07	L2MAIN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
LA8	L2MAIN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
LB8	L2MAIN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
L09	L2MAIN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
LAA	L2MAIN	TUB	1143	60			API 2H Grade 42	
CNL	CONL	TUB	1143	25	965.2		ASTM A36	
LBB	L3MAIN	TUB	965.2	25			ASTM A36	
LBB	L3CAN	TUB	995.2	40			API 2H Grade 42	
LA1	L3CAN	TUB	995.2	40			API 2H Grade 42	
LA1	L3MAIN	TUB	965.2	25			ASTM A36	
LB1	L3MAIN	TUB	965.2	25			ASTM A36	
LB1	L3CAN	TUB	995.2	40			API 2H Grade 42	
L12	L3CAN	TUB	995.2	40			API 2H Grade 42	
L12	L3MAIN	TUB	965.2	25			ASTM A36	
L12	L3CAN	TUB	995.2	40			API 2H Grade 42	
L13	LSCAN	TUB	995.2	40			API 2H Grade 42	
L13	LSMAIN	TUB	945.2	15			ASTM A36	
L13	LSCAN	TUB	975.2	30			API 2H Grade 42	
LA3	LSCAN	TUB	975.2	30			API 2H Grade 42	
BB3	LSCAN	TUB	975.2	30			API 2H Grade 42	
LB3	LSMAIN	TUB	945.2	15			ASTM A36	
LB3	LSCAN	TUB	975.2	30			API 2H Grade 42	
BA4	LSCAN	TUB	975.2	30			API 2H Grade 42	
LA4	LSCAN	TUB	975.2	30			API 2H Grade 42	
LA4	LSMAIN	TUB	945.2	15			ASTM A36	
BB4	LSMAIN	TUB	95.2	15			ASTM A36	
LB4	LSMAIN	TUB	945.2	15			ASTM A36	
LB4	LSCAN	TUB	975.2	30			API 2H Grade 42	

Table 15 하부구조 Group ID 와 부재 치수 - 계속

Group	Sect	Type	O.D	Thick	Pile	Eff.Wt	Materail Type	비고
H01	H00	TUB	558.8	22			ASTM A36	Horizontal Brace
H02	H00	TUB	558.8	22			ASTM A36	
H03	H00	TUB	558.8	22			ASTM A36	
H04	H00	TUB	558.8	22			ASTM A36	
H05	H00	TUB	558.8	22			ASTM A36	
H06	H00	TUB	558.8	22			ASTM A36	
H07	H01	TUB	508	22			ASTM A36	
H08	H01	TUB	508	22			ASTM A36	
H09	H01	TUB	508	22			ASTM A36	
H10	H01	TUB	508	22			ASTM A36	
H11	H01	TUB	508	22			ASTM A36	
H12	HS1	TUB	498	17			ASTM A36	
H13	HS1	TUB	498	17			ASTM A36	
H14	HS1	TUB	498	17			ASTM A36	
A14	A14	TUB	346	14			ASTM A36	
D01	D0	TUB	558.8	22			ASTM A36	Diagonal Brace
D02	D0	TUB	558.8	22			ASTM A36	
D03	D0	TUB	558.8	22			ASTM A36	
D04	D0	TUB	558.8	22			ASTM A36	
D05	D0	TUB	558.8	22			API 2H Grade 42	
D06	D0	TUB	558.8	22			API 2H Grade 42	
D07	D0	TUB	558.8	22			API 2H Grade 42	
D08	D0	TUB	558.8	22			API 2H Grade 42	
D09	D1	TUB	508	22			ASTM A36	
D10	D1	TUB	508	22			ASTM A36	
D11	D1	TUB	508	22			ASTM A36	
D12	DS1	TUB	498	17			ASTM A36	
D13	DS1	TUB	498	17			ASTM A36	
FH1	FH1	TUB	498	19			ASTM A36	Boat Landing
FH2	FH2	TUB	447.2	14			ASTM A36	
FH3	FH3	TUB	257.4	4			ASTM A36	
FV1	FV1	TUB	447.2	17			ASTM A36	
FV2	FV2	TUB	345.6	7			ASTM A36	
MH1	MH1	TUB	609.6	22			ASTM A36	Mudmat
MH2	MH2	TUB	711.2	22			ASTM A36	
PIN	PIN	TUB	1162.	35.0			ASTM A36	Pile
PIL	PIL	TUB	1016	40			ASTM A36	
H34	SH02	TUB	711.2	22			API 2H Grade 42	Horizontal Brace
H56	SH02	TUB	711.2	22			API 2H Grade 42	
H78	SH02	TUB	711.2	22			API 2H Grade 42	

Table 16 하부구조 Group ID와 부재 치수 -계속

Group	Sect	Type	O.D	Thick	Pile	Eff.Wt	Materail Type	비고
SV1	SVC	CTB	1338.4	50	1162.2	55.3	API 2H Grade 42	Skirt Vertical Brace
SV2	SVC	CTB	1338.4	50	1162.2	55.3	API 2H Grade 42	
SV3	SVC	CTB	1338.4	50	1162.2	55.3	API 2H Grade 42	
SV4	SVC	CTB	1338.4	50	1162.2	55.3	API 2H Grade 42	
SV5	SVC	CTB	1338.4	50	1162.2	55.3	API 2H Grade 42	
SV6	SVC	CTB	1338.4	50	1162.2	55.3	API 2H Grade 42	
SV7	SVC	CTB	1338.4	50	1162.2	55.3	API 2H Grade 42	
SV8	SVC	CTB	1338.4	50	1162.2	55.3	API 2H Grade 42	
SP1	SP1	TUB	508	22			ASTM A36	Skirt Pile Support
SP2	SP1	TUB	508	22			ASTM A36	
SP3	SP3	TUB	1154.8	19			ASTM A36	
SS3	SS3	TUB	11444.8	14			ASTM A36	
SP4	SS2	TUB	498	17			ASTM A36	
SP5	SS2	TUB	498	17			ASTM A36	차세대 조위계
TU1	TU1	TUB	609.6	22			ASTM A36	
TU2	TU2	TUB	324	12			ASTM A36	

Table 17 상부구조 Group ID와 부재 치수

Group	Sect	Type	O.D	Wt	Pile	Eff.Wt	Materail Type	비고
101	101	TUB	101.6	5			ASTM A36	Celler Deck
125	125	WF	125	9	125	6	ASTM A36	
HP1	HP	WF	300	20	588	12	ASTM A36	
HS1	HS	WF	125	9	250	6	ASTM A36	
H1P	H1P	WF	200	13	400	8	ASTM A36	
HP2	HP	WF	300	20	588	12	ASTM A36	Main Deck
HS2	HS	WF	125	9	250	6	ASTM A36	
H2P	H1P	WF	200	13	400	8	ASTM A36	
HP3	HP	WF	300	20	588	12	ASTM A36	Roof Deck
HS3	HS	WF	125	9	250	6	ASTM A36	
H3P	H1P	WF	200	13	400	8	ASTM A36	
VD	VD	TUB	558.8	16			ASTM A36	기둥
VD3	VD	TUB					ASTM A36	
VD3	VDC	TUB	558.8	22			API 2H Grade 42	
VD2	VDC	TUB					API 2H Grade 42	
CON	CON	CON	995.2	25	558.8		ASTM A36	
LGT	LGTS	TUB	975.2	15			ASTM A36	
VD1	VD1	TUB	975.2	30			API 2H Grade 42	

3.4.2.2 Perform 3-D 부재별 물성치

모델링에 적용된 비선형 물성그래프는 Trilinear를 사용하였고 Strength Loss 옵션을 사용하였다. F_y 와 F_u 값은 부재마다 강종이 달라 상이하나 F_u 값이 F_y 의 약 1.25배로 설정하였고 Strength Loss는 D / D_y 값으로 6으로 설정하였다.

전소성 모멘트는 부재의 크기와 강종을 고려하여 산정하였고 F_y 와 F_u 상태의 모멘트 값 또한 약 1.25배로 설정하였고 모든 물성치는 그래프는 대칭으로 설정하였다. Perform 3-D에 적용된 하부의 Beam, Brace, Leg의 비선형 물성치 그래프는 다음 Fig. 12,13,14와 같다.

Modulus of Elasticity는 19995kN/cm^2 으로 KBC에서 적용하는 $205,000\text{MPa}$ 와는 다소 차이가 있으나 이는 ASTM규격에서 적용하는 강재와 단위차이로 본 모델에서는 해수부 설계보고서에서 적용한 ASTM규격을 사용하였다.

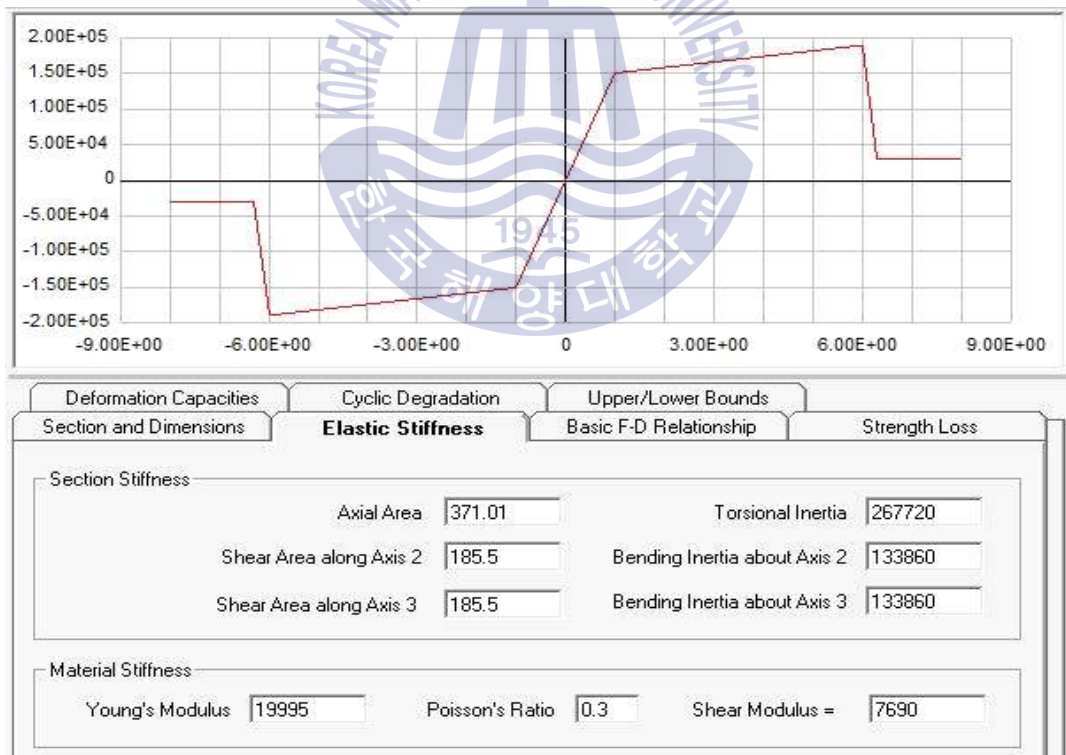


Fig. 12 하부 Beam 물성치(단위 : kN, cm)

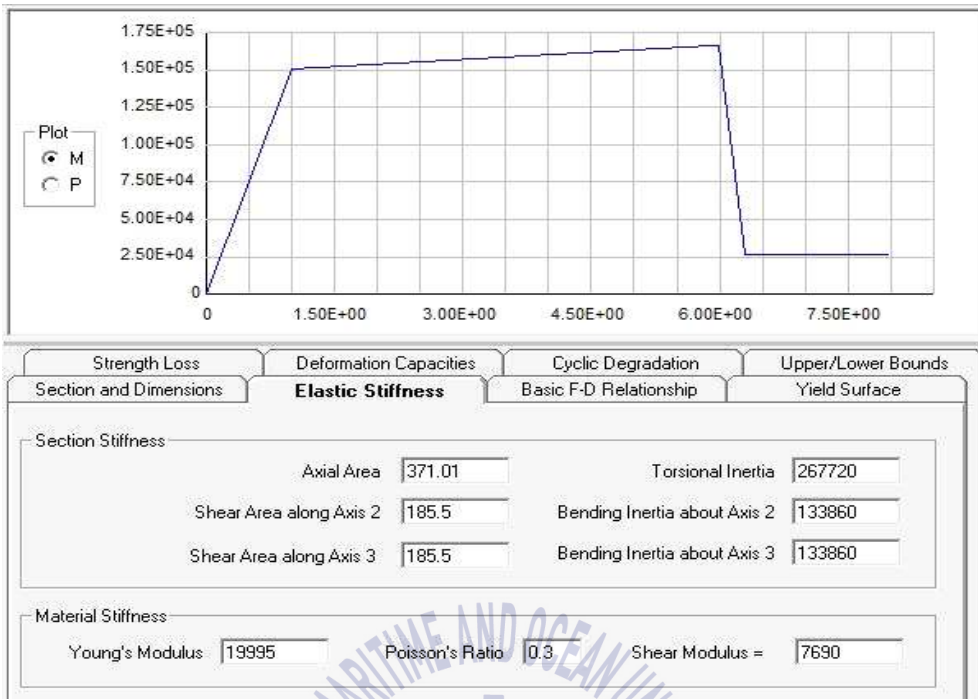


Fig. 13 하부 Brace 물성치(단위 : kN, cm)

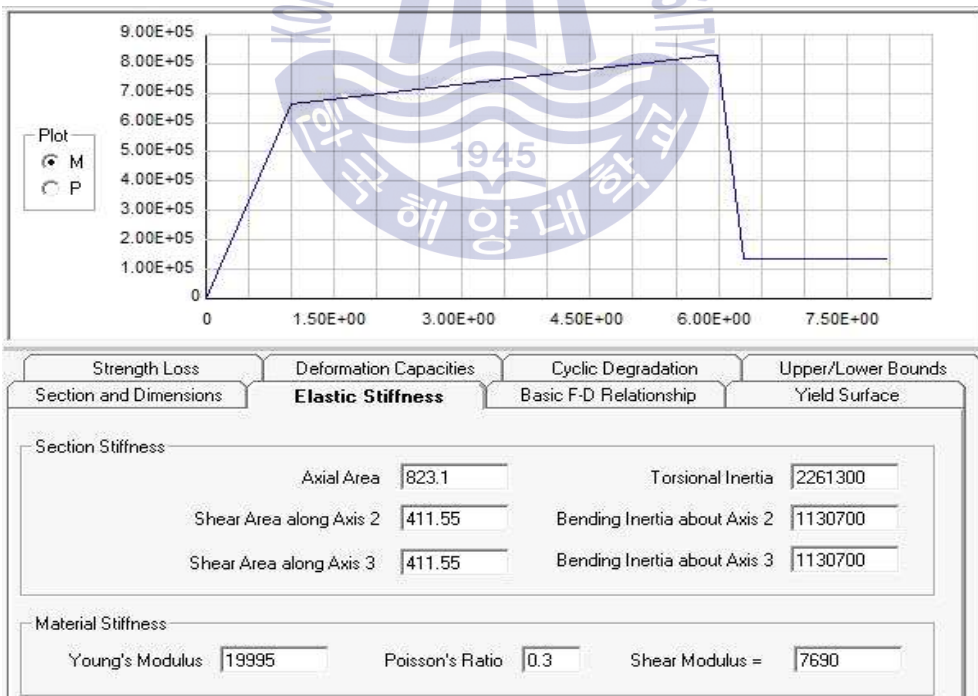


Fig. 14 하부 Leg 물성치(단위 : kN, cm)

3.5. 예제구조물의 풍, 파랑, 조류에 대한 푸쉬오버해석

풍, 파랑, 그리고 조류에 의한 수평하중에 대하여 변위증분법을 적용한 Nonlinear pushover 해석을 수행하였다. 범용 구조해석프로그램인 Midas Gen을 이용하여 해석을 수행했으며 재료비선형 특성 값은 FEMA에서 추천하는 값을 적용하였다. Skeleton Curve는 Fig. 15, 16과 같다. 예제구조물의 해석결과 성능곡선은 Fig. 17과 같다.

0° 방향에 대하여 설계하중에 대한 구조물의 최상부 수평변위는 약 0.383m 정도이며, 이때의 밀면전단력은 7027.2kN이다. 이후로 계속해서 변위를 증가시키면 0.887m에서 Leg부재(LA5)에서 휨에 의한 1차 항복이 발생하며 이때의 밀면전단력 16,268.1kN이다.

최상부 변위가 0.975m에서 극한밀면전단력(18,028.4kN)에 도달한 후 대각 Brace(D04,D06)가 압축에 의해 항복하면서 구조물이 서서히 붕괴하게 되며 이때 구조물의 RSR값은 2.566(18,028.4/7,027.2)로 Table 7의 손상도 등급으로 Middle등급이다(LINC보고서, 2015).

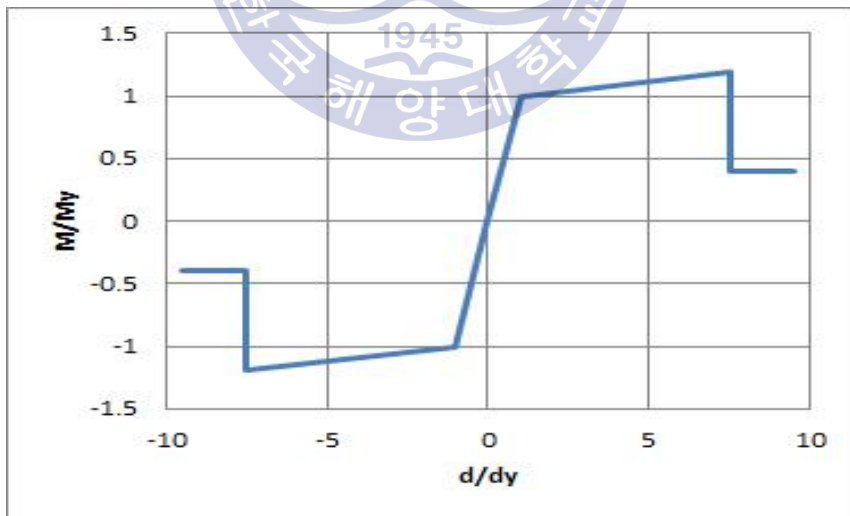


Fig. 15 휨에 대한 Skeleton Curve

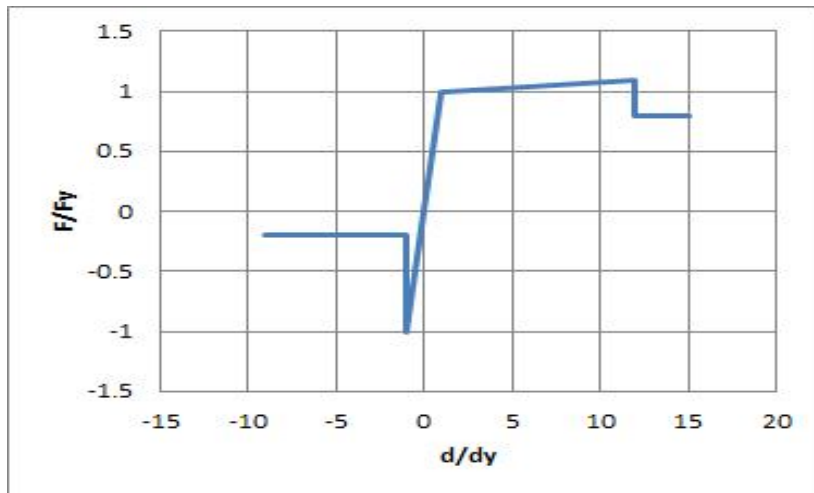


Fig. 16 축력에 대한 Skeleton Curve

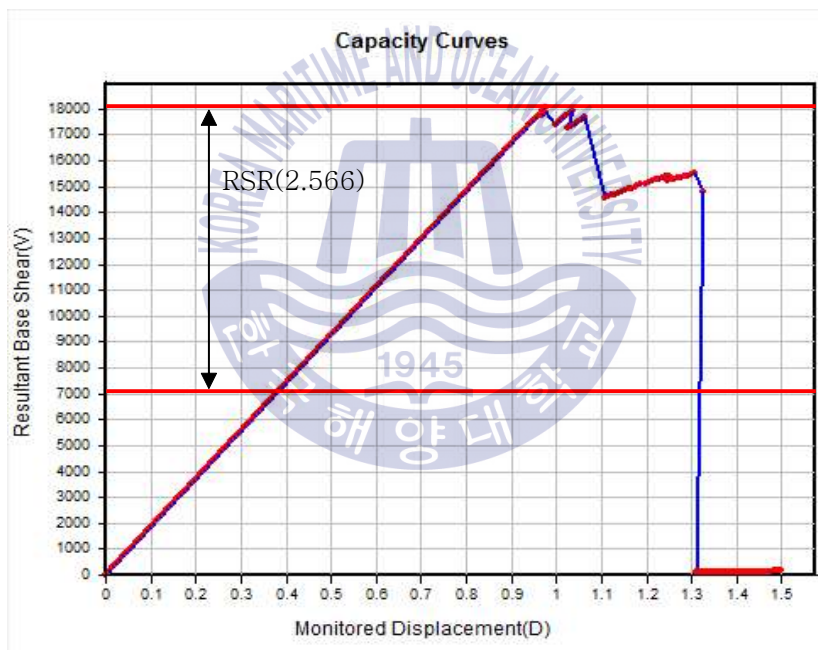


Fig. 17 MIDAS 해석결과 0° 방향 성능곡선

3.6. 예제구조물의 지진하중에 대한 푸쉬오버해석

Perform 3-D를 이용하여 지진하중에 의한 수평 층 전단력에 대해 푸쉬오버 해석을 실시하였다. 재료비선형 특성 값은 FEMA에서 추천하는 값을 적용하였으며 Fig. 12, 13, 14와 같다. 예제구조물의 지진파에 대한 층 전단력을 구하기

위해 Table 19 과 같이 예제구조물의 설치예정인 지역의 지진구역 계수 0.11, 지반종류 SB, 위험도계수 1.4를 적용하여 스펙트럼 생성하고 스펙트럼에 대한 층 전단력을 예제구조물에 적용하였다.

Table 18 하중조합계수(해양연구원, 2007)

내진성능기준	적용가속도(g)
기능수행수준	0.063
붕괴방지수준	0.154

Table 19 지진구역계수(해양연구원, 2007)

구분	값	설명
지진구역계수	0.11	인천광역시의 경우 지진구역 1에 해당
지반의 종류	SB	보통암
위험도 계수	0.57	기능수행수준, 내진 1등급으로 재현주기 100년에 해당
위험도 계수	1.40	붕괴방지수준, 내진 1등급으로 재현주기 1000년에 해당

Pushover 해석결과 설계하중에 대한 구조물의 최상부 수평변위는 약 0.484m 정도이고 이때의 밀면전단력은 3,170kN이다. 극한하중일 때 최상부 수평변위가 0.95m에서 극한밀면전단력(5,179kN)으로 나타났다.

이후 Leg15가 휨에 의해 항복하면서 구조물이 서서히 붕괴되며 이때 구조물의 RSR값은 1.633(5,179/3,170)이다. Table7의 손상도 등급으로 High등급이고 예제구조물의 지진하중에 대한 해석결과인 Base shear(kN) vs Reference Drift 그래프는 Fig. 15와 같다.

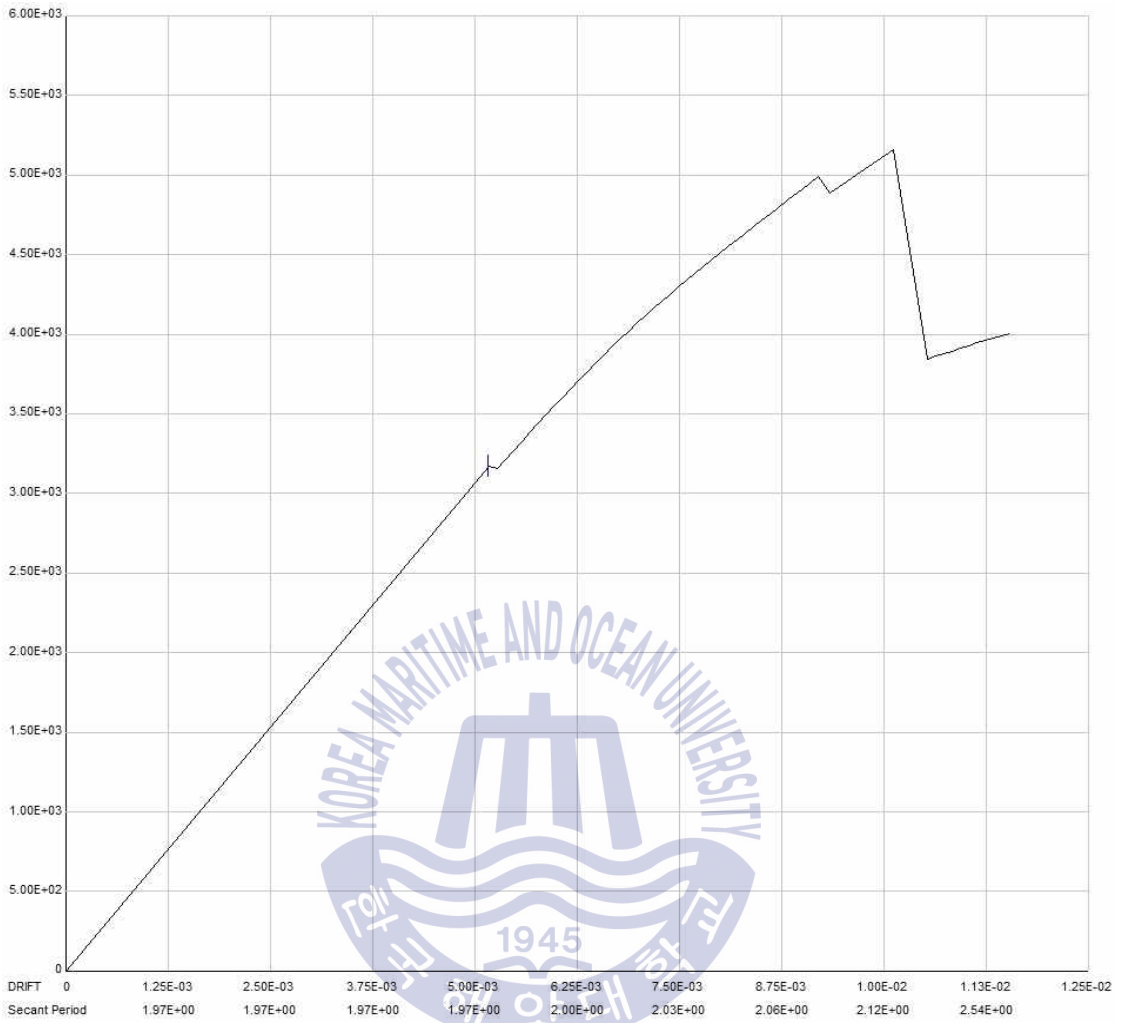


Fig. 18 Base shear(kN) vs Reference Drift

풍, 파랑, 조류에 의한 수평하중을 적용한 해석에서는 층별 하중의 크기가 완만한 기울기로 하중이 증가했었지만 지진하중에 대해서는 Fig. 19와 같이 Mass가 많은 상층부에서 집중적으로 큰 하중이 나타남을 확인 할 수 있었다.

하중의 차이가 큰 이유는 하중의 특성에 따른 결과로 풍, 파랑, 조류는 특정 지역에서 수심에 따라 값이 변하지만 지진하중에 대한 층 전단력은 Mass에 영향을 받기 때문에 구조물의 형상이나 고정하중의 크기에 따라 다르게 나타나므로 하중을 많이 받는 상부에서 크게 나타난다.

Pushover 해석을 비교해보면 지진하중을 적용한 경우 풍, 파랑, 조류를 적용하였을 때 보다 RSR값이 약 0.9 정도 작게 나타났으며 손상도 등급도 High로 차이가 크게 나타났다. 그러므로 이러한 결과는 예제구조물이 지진하중에 대해 취약하다는 것을 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 다음 4장에서는 비선형 시간 이력해석을 통해 구조물이 지진하중에 대해 안전성을 확보하고 있는지 확인하고자 한다.

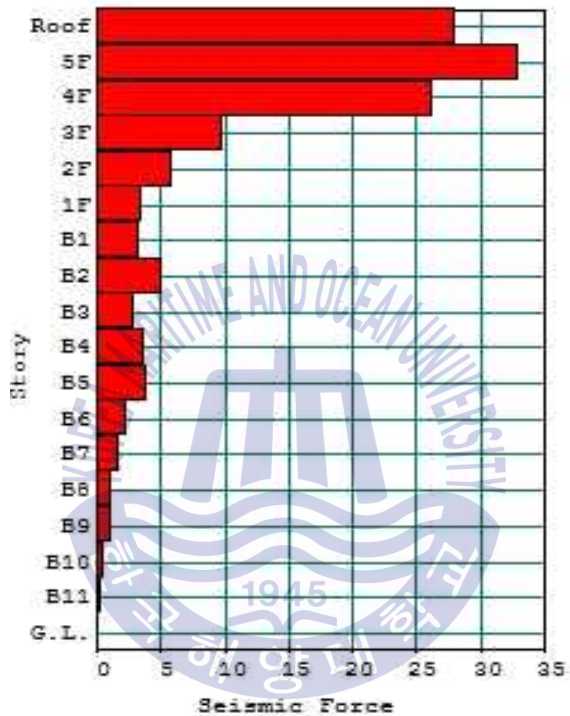


Fig. 19 층별 지진하중에 대한 전단력

제 4 장 해양자켓구조물의 비선형 시간이력해석

4.1 비선형 시간이력 해석법

비선형시간영역해석은 구조물의내진성능을 평가하는 기법으로서 부재의 비선형 특성과 하중의 시간의존적인 특성을 반영할 수 있는 가장 발전적인 방법이다. 일반적으로 비선형시간영역해석에는 직접적분법(Direct Integration Method)이 적용되며, 각 시간간격에서의 변위증분을 구해 누적하는 방식으로 수행된다. 각각의 시간간격 내에서 부재의 강성이 변화함에 따라 발생하는 불평형력이 해소될 때까지 반복해석을 수행해야 한다. 대표적인 직접적분법에는 Newmark- β 법, Wilson- θ 법 등이 있으며, 수치반복법에는 Arc-Length법, Newton-Raphson 법 등이 있다.(최한식 외3인, 2005)

4.2 모델링 개요

비선형 동적 해석모델은 pushover해석을 실시한 모델링과 동일하며 Perform 3-D로 지진해석을 위한 구조물의 기본모델링과 수면상부 10m부분에 brace를 보강한 각각의 해석 모델은 Fig. 20과 같다.

보강모델을 추가로 해석한 이유는 구조물의 고유진동수와 비슷한 장주기의 지진파를 이용하여 해석하였을 때 공진이 발생하여 하중이 전부 적용되지 못하고 Leg부재에 응력집중현상이 일어나며 해석이 종료 된다. 그러므로 대상구조물의 비선형적 특성을 더 알아보기 위해 국부파손 되는 Leg에 Brace로 보강한 모델에 대해서도 해석을 실시하고 공진이 발생하였을 때의 자켓구조물의 거동을 분석하였다.

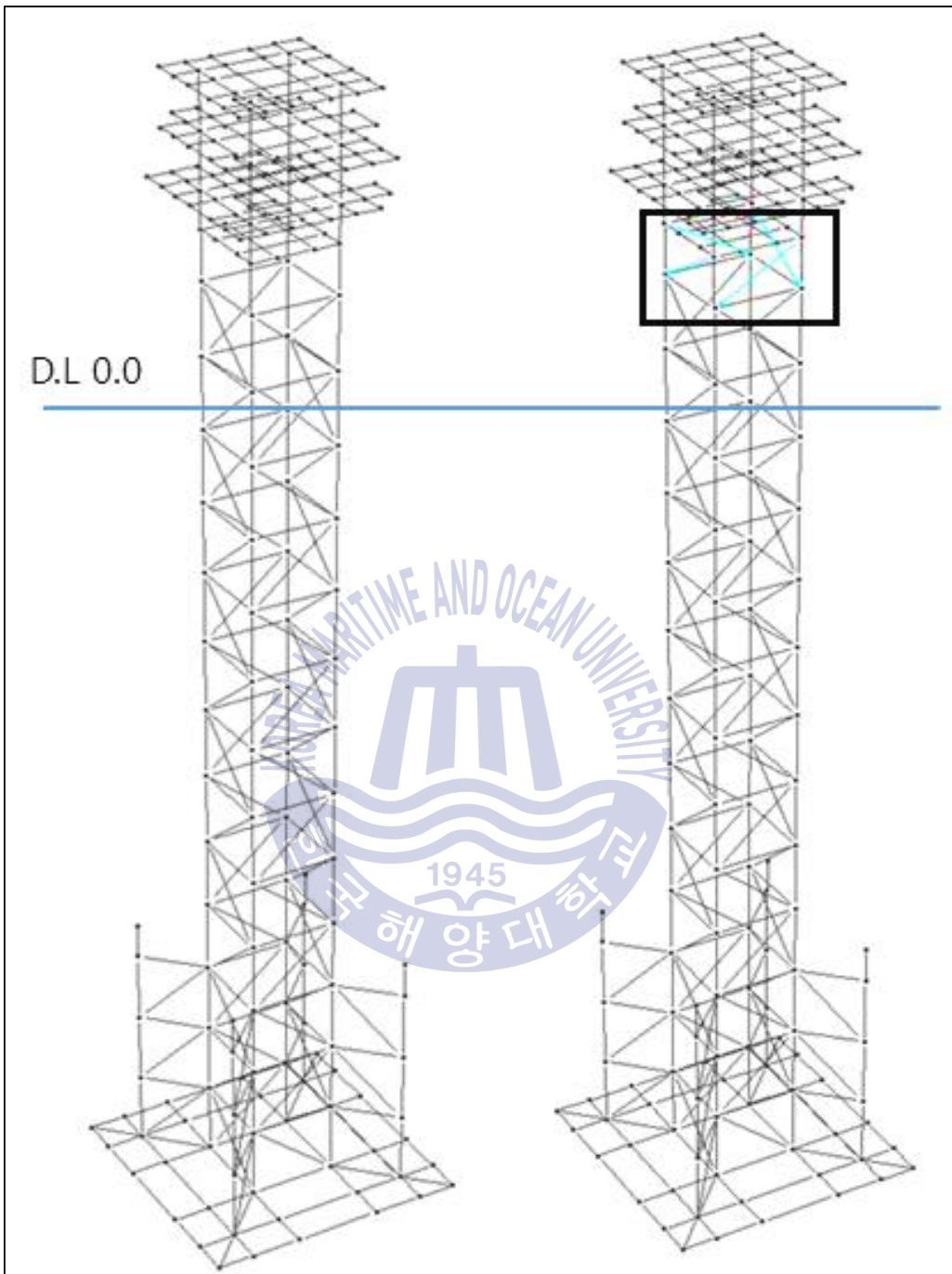


Fig. 20 자켓구조물 기본모델(좌) 보강모델(우)

4.3 적용 지진파의 종류

자켓구조물의 해석에 사용한 지진파는 극한하중에서의 거동을 살펴보기 위해 대상구조물의 고유진동수를 고려하여(Table 20) 장주기 지진파인 1985, Mexico City, Station 1, 180 Deg와 일반적으로 지진해석에 사용되는 강진인 1940, El Centro Site, 270 Deg로 해석을 실시하였다(Fig. 21,22). 특히 장주기 지진파인 Mexico의 경우 공진으로 인해 해석수행 시 하중이 전부 적용되지 못하고 응력 집중현상으로 Leg부재가 국부파손 되기 때문에 50%의 가속도의 대해서도 해석을 수행 하였다.

Table 20 구조물 고유주기

Mode No.	Frequency (Hz)	Period (secs)
1	0.5073	1.971
2	0.5787	1.969
3	1.1158	0.8962

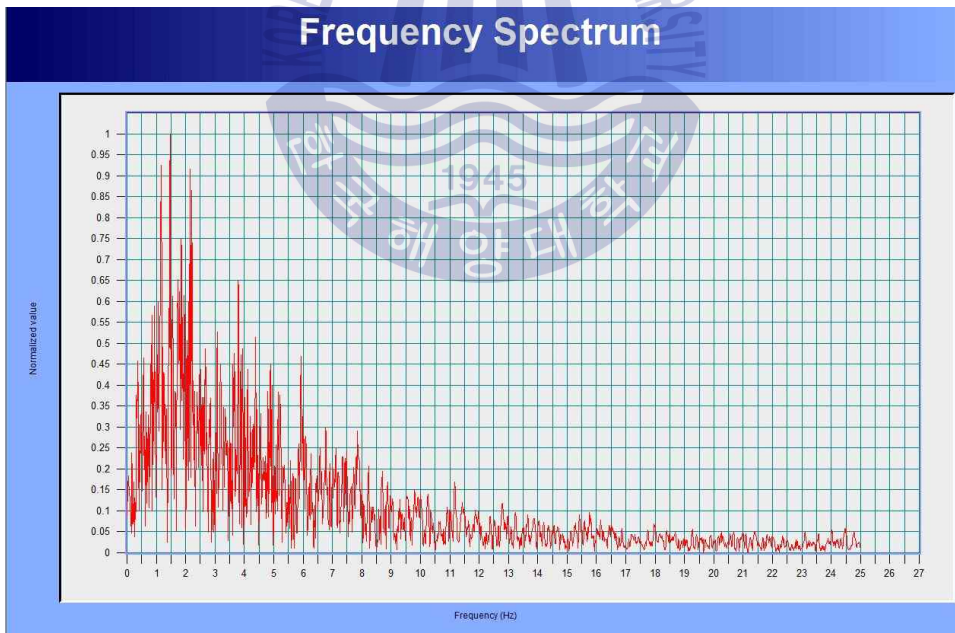


Fig. 21 El Centro 지진파 Frequency Spectrum
(Max = 1.46Hz 규모 7.1)

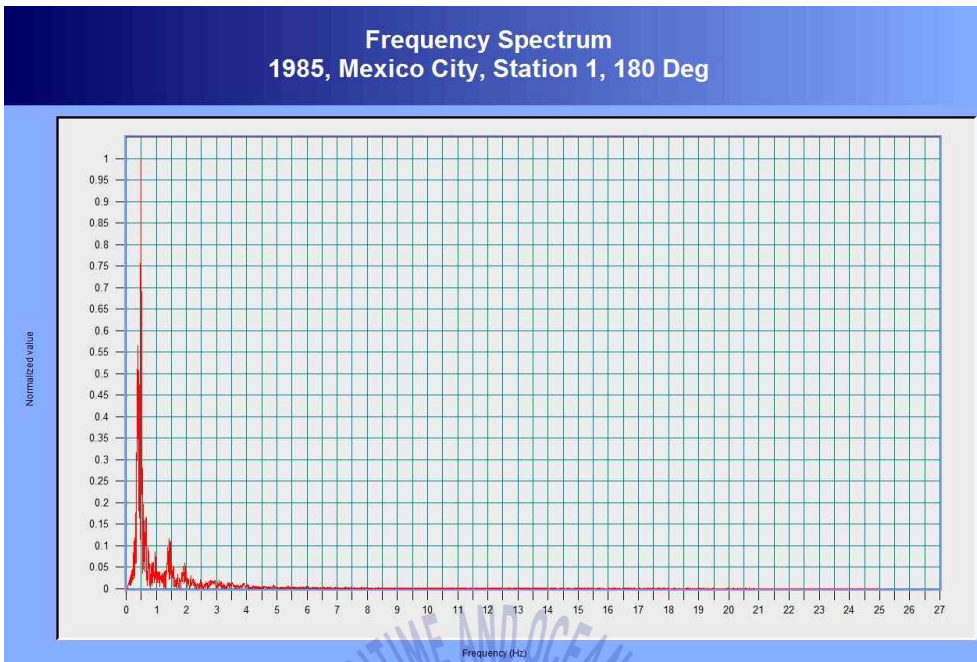


Fig. 22 Mexico 지진과 Frequency Spectrum
(Max = 0.49Hz 규모 8.1)

4.4 자켓구조물의 내진성능평가 방법

자켓구조물의 지진에 대한 내진성능을 평가하기 위하여 해석결과에 국토해양부, 한국시설안전공단의 기존 시설물 내진성능 평가요령(KBC2016적용)에 따라 구조시스템에 대한 층간변형각 성능수준 Table 22를 적용하여 평가하였고 평가 기준 Table 21에 따라 구조시스템평가 결과가 IO, LS등급인 경우 목표성능에 준한 것으로 보고, 등급이 CP이상인 경우에는 상세평가를 실시하여야 하며 최종 성능수준은 각 층 및 방향별로 성능수준을 결정한 후 가장 불리한 성능수준으로 정한다.

상세평가에 적용된 부재별 허용기준은 Table 23과 같고 상세평가에서 항복회전각 θ_y 는 전소성모멘트를 강성으로 나누어 나타낼 수 있으며 각각의 성능수준별 허용기준은 Table 23에 따라 항복회전각에 각각의 계수를 곱하여 성능수준별 허용기준을 구하고 이에 따라 부재별로 판별한다.

예제구조물의 상세평가에 적용되는 부재별 허용기준은 강종과 부재길이에 따

라 다르므로 Table 24와 같이 산정하여 나타내었다.

내진성능평가에 신뢰도를 높이기 위하여 Perform 3-D의 Limit states 옵션을 이용하여 부재별 상태를 확인 하였다.

Table 21 구조물의 내진성능 판정법

등급 부호	지진 재현주기 별 성능수준	예비평가	상세평가	조치
	2400년 2/3			
A등급	IO 이하	Excellent	Excellent	일상적인 유지관리
B등급	LS	Good	Good	목표성능에 준하여 내진보수/보강에 의해 기능수행
C등급	LSR	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
D등급	CP	상세평가 실시	보강 / 철거판단	경제성분석에 의해 전체 구조의 성능개량이나 철거를 판단하고, 성능개량 판정 시에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 전면적으로 개량하여 내진성능을 향상
E등급	C	상세평가 실시		

Table 22 성능수준별 허용충간 변형각(%) - 구조시스템 평가

구조시스템	내진설계된 경우			내진설계 되지 않은 경우		
	IO	LS	CP	IO	LS	CP
철골골조	0.7	2.5	5	0.55	2.0	4
가새가있는 철골골조	0.5	1.5	2	0.4	1.2	1.6

Table 23 철골부재의 허용기준

강접모멘트골조	허용기준(소성회전각, rad)				
	거주가능	1차부재		2차부재	
		인명안전	붕괴방지	인명안전	붕괴방지
보	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$8\theta_y$	$9\theta_y$	$11\theta_y$
기둥	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$8\theta_y$	$9\theta_y$	$11\theta_y$

Table 24 층 부재별 허용 층간변형각(θ) - 부재별 평가

층	IO	LS	CP
1	0.001154	0.006923	0.009231
2	0.001154	0.006923	0.009231
3	0.001267	0.0076	0.010133
4	0.001267	0.0076	0.010133
5	0.001267	0.0076	0.010133
6	0.001267	0.0076	0.010133
7	0.001267	0.0076	0.010133
8	0.001267	0.0076	0.010133
9	0.0015	0.009	0.012
10	0.001283	0.007696	0.010262
11	0.001283	0.007696	0.010262
12	0.00131	0.007859	0.010479
13	0.00131	0.007859	0.010479
14	0.001477	0.008863	0.011817
15	0.001108	0.006647	0.008863
16	0.001662	0.00997	0.013294
17	0.001662	0.00997	0.013294

4.5 예제구조물의 El Centro 지진파에 대한 해석 및 결과

4.5.1 기본모델의 해석

El centro 지진파에 대한 구조물의 층변위와 층하중은 Fig. 23,24 최상층의 시간변위응답 그래프는 Fig 25,26에 나타내었다. 비선형 동적해석의 신뢰성을 위해서 적용지진파를 50%수준에 대해서도 해석을 수행하였다.

해석결과는 Table 25와 같고 최대층간 변형각은 각각 1/102, 1/71로 일본건축센터의 고층건축물평정에 사용하는 기준인 1/80이하를 100% 지진파해석결과는 만족하지 못했다. 내진성능평가 결과는 모두 인명안전수준을 타나났다.

Table 25 기본모델의 El Centro 지진파 해석결과

적용지진파	최대층간 변형각(rad)	내진성능평가 성능수준	부재상태 확인
El centro 50%	1/102	인명안전수준	상부수평부재 항복
El centro 100%	1/71	인명안전수준	상부수평부재 항복

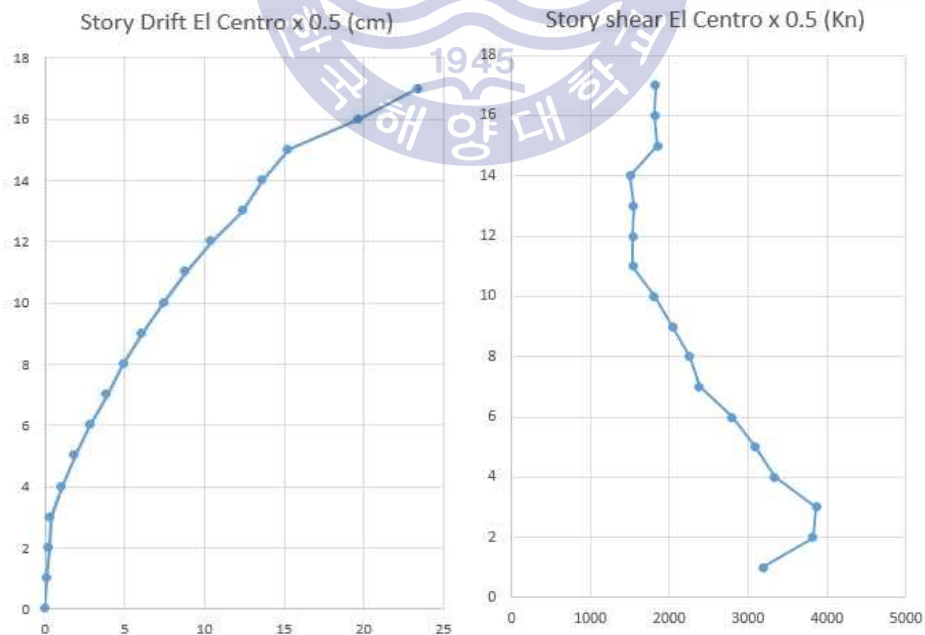


Fig. 23 El Centro 50% 지진파에 대한 층변위와 층하중

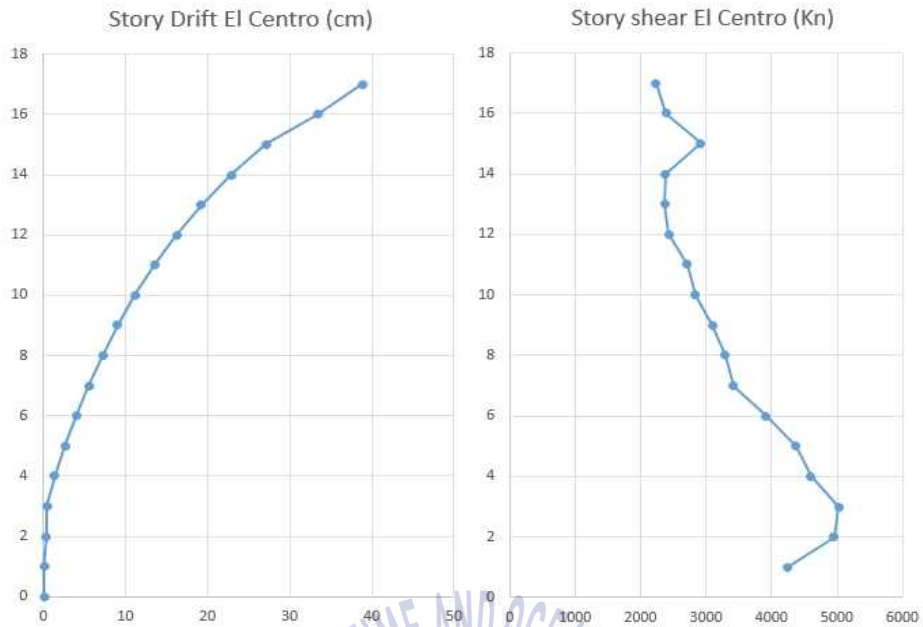


Fig. 24 El Centro 100% 지진파에 대한 층변위와 층하중

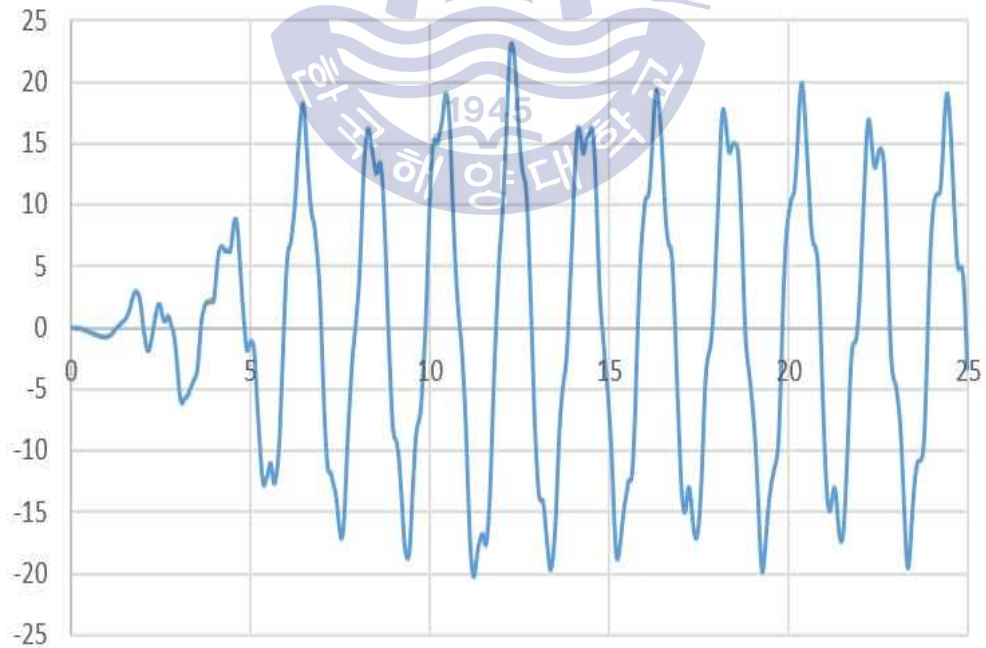


Fig. 25 El Centro 50% 지진파에 대한 기본모델 최상층의 변위(cm)응답

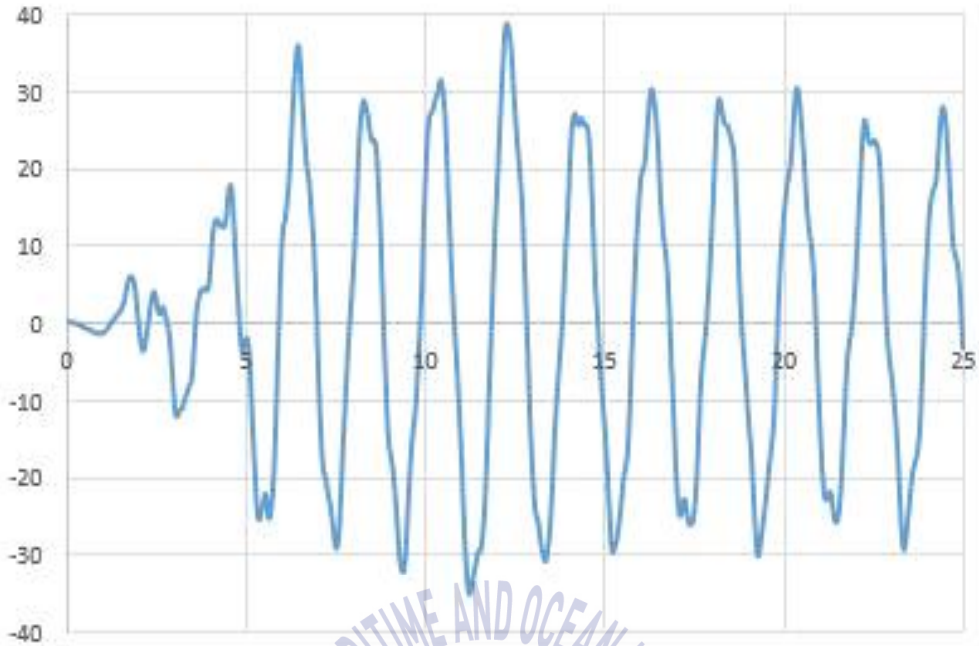


Fig. 26 El Centro 100% 지진파에 대한 기본모델 최상층의 변위(cm)응답

Table 26 El Centro 지진 50%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과

층수	층고(M)	층간변위(M)	층간변형각(θ)	IO	LS	CP
1층	6.0	0.00112	0.000186	OK	OK	OK
2층	6.0	0.00148	0.000247	OK	OK	OK
3층	6.0	0.00111	0.000185	OK	OK	OK
4층	6.0	0.00666	0.001110	OK	OK	OK
5층	6.0	0.00847	0.001412	OK	OK	OK
6층	6.0	0.00955	0.001592	OK	OK	OK
7층	6.0	0.01017	0.001695	OK	OK	OK
8층	6.0	0.01086	0.001810	OK	OK	OK
9층	6.0	0.01146	0.001910	OK	OK	OK
10층	6.0	0.01367	0.002278	OK	OK	OK
11층	6.0	0.01360	0.002267	OK	OK	OK
12층	6.0	0.01630	0.002717	OK	OK	OK
13층	6.0	0.01920	0.003200	OK	OK	OK
14층	4.0	0.01300	0.003250	OK	OK	OK
15층	3.0	0.01607	0.005357	OK	OK	OK
16층	4.5	0.04423	0.009829	NG	OK	OK
17층	4.5	0.03650	0.008111	NG	OK	OK

최종 성능수준 : 인명안전

Table 27 El Centro 지진 100%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과

층수	층고(M)	층간변위(M)	층간변형각(θ)	IO	LS	CP
1층	6.0	0.000536	0.000089	OK	OK	OK
2층	6.0	0.001808	0.000301	OK	OK	OK
3층	6.0	0.001333	0.000222	OK	OK	OK
4층	6.0	0.009314	0.001552	OK	OK	OK
5층	6.0	0.012320	0.002053	OK	OK	OK
6층	6.0	0.014240	0.002373	OK	OK	OK
7층	6.0	0.015080	0.002513	OK	OK	OK
8층	6.0	0.016780	0.002797	OK	OK	OK
9층	6.0	0.017920	0.002987	OK	OK	OK
10층	6.0	0.021590	0.003598	OK	OK	OK
11층	6.0	0.023400	0.003900	OK	OK	OK
12층	6.0	0.027400	0.004567	OK	OK	OK
13층	6.0	0.029300	0.004883	OK	OK	OK
14층	4.0	0.037000	0.009250	NG	OK	OK
15층	3.0	0.042400	0.014133	NG	OK	OK
16층	4.5	0.062900	0.013978	NG	OK	OK
17층	4.5	0.053900	0.011978	NG	OK	OK

최종 성능수준 : 인명안전

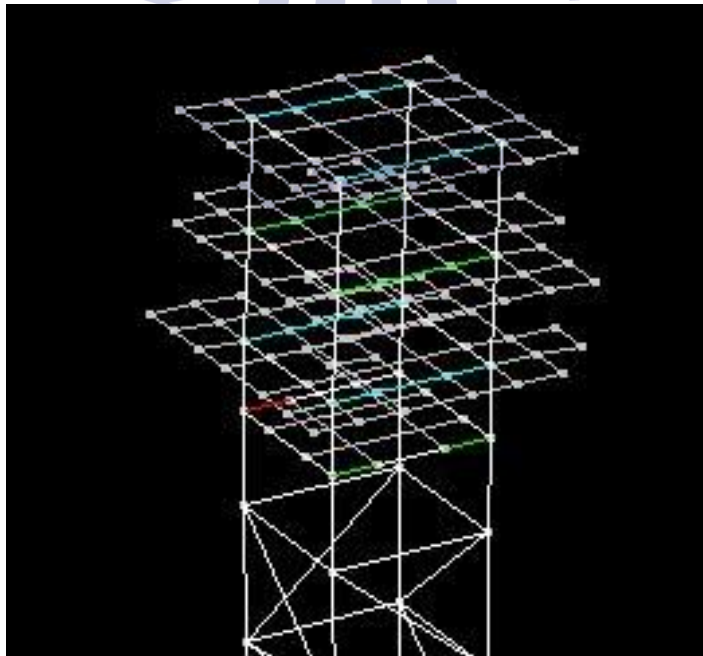


Fig. 27 El centro 100% 지진 파괴메커니즘

4.5.2 보강모델의 해석

Elcentro 지진파에 대한 보강모델의 층변위와 층하중은 Fig. 28,29 최상층의 시간변위응답 그래프는 Fig 30,31에 나타내었다. 비선형 동적해석의 신뢰성을 위해서 적용지진파를 50%수준에 대해서도 해석을 수행하였다.

해석결과는 Table27과 같고 최대층간 변형각은 각각 1/141, 1/77로 기본모델링 보다 더 안정적이지만 동일하게 일본건축센터의 고층건축물평정에 사용하는 기준인 1/80이하를 100% 지진파해석결과는 만족하지 못했다. 내진성능평가 결과는 모두 인명안전수준을 타나났다.

Table 28 보강모델의 El Centro 지진파 해석결과

적용지진파	최대층간 변형각(rad)	내진성능평가 성능수준	부재상태확인
El centro 50%	1/141	인명안전수준	상부수평부재 항복
El centro 100%	1/77	인명안전수준	상부수평부재 항복

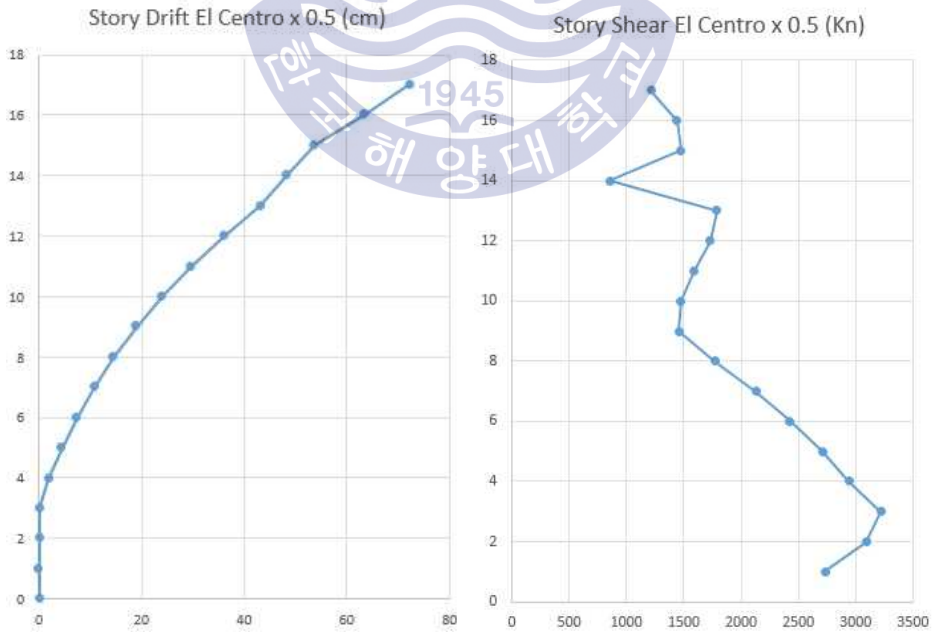


Fig. 28 El Centro 50% 지진파에 대한 층변위와 층하중

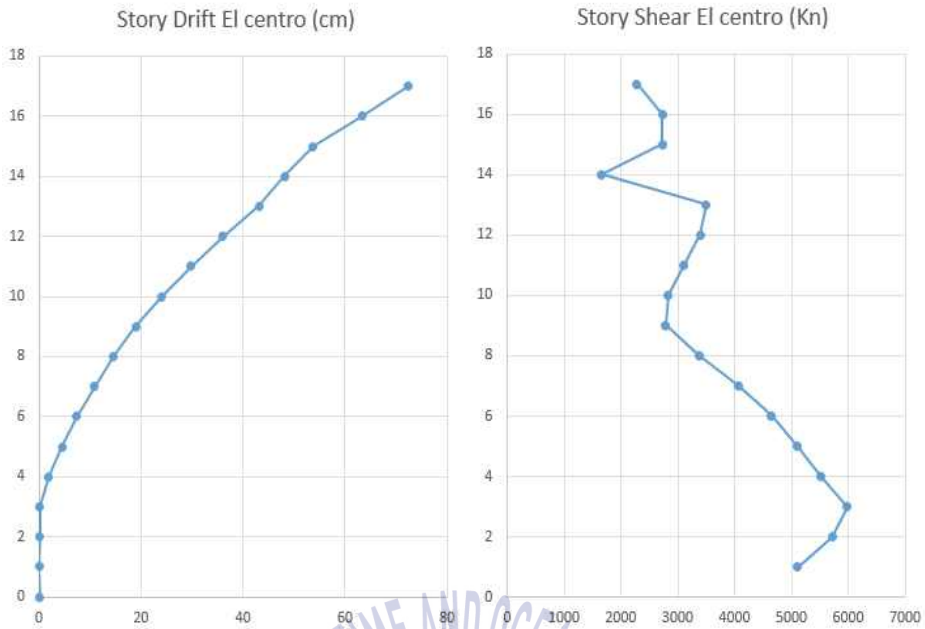


Fig. 29 El Centro 100% 지진파에 대한 층변위와 층하중

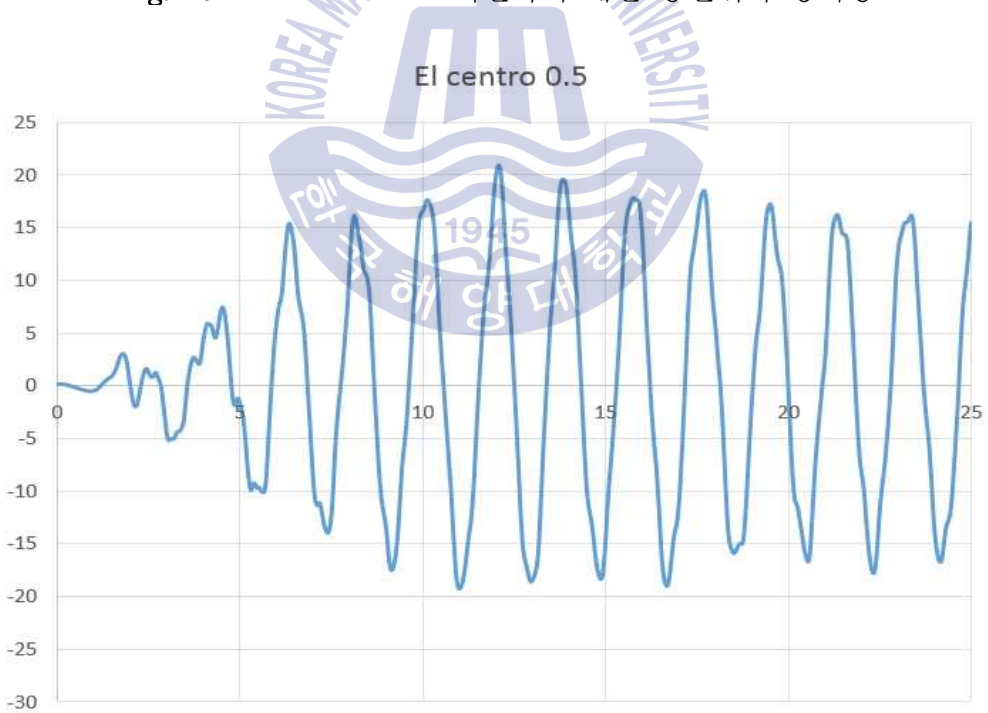


Fig. 30 El Centro 50% 지진파에 대한 보강모델 최상층의 변위(cm)응답

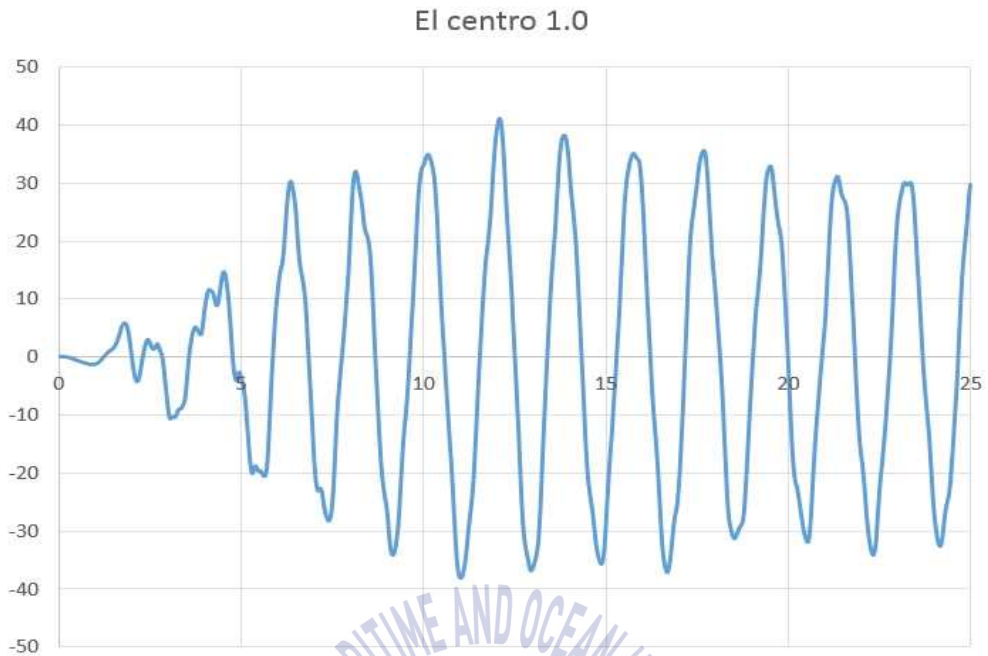


Fig. 31 El Centro 100% 지진파에 대한 보강모델 최상층의 변위(cm)응답

Table 29 El Centro 지진 50%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과

층수	층고(M)	층간변위(M)	층간변형각(θ)	IO	LS	CP
1층	6.0	0.00043	0.00007	OK	OK	OK
2층	6.0	0.00118	0.00020	OK	OK	OK
3층	6.0	0.00095	0.00016	OK	OK	OK
4층	6.0	0.00662	0.00110	OK	OK	OK
5층	6.0	0.00929	0.00155	OK	OK	OK
6층	6.0	0.00997	0.00166	OK	OK	OK
7층	6.0	0.01089	0.00181	OK	OK	OK
8층	6.0	0.01109	0.00185	OK	OK	OK
9층	6.0	0.01261	0.00210	OK	OK	OK
10층	6.0	0.01280	0.00213	OK	OK	OK
11층	6.0	0.01461	0.00243	OK	OK	OK
12층	6.0	0.01460	0.00243	OK	OK	OK
13층	6.0	0.01694	0.00282	OK	OK	OK
14층	4.0	0.01114	0.00279	OK	OK	OK
15층	3.0	0.01216	0.00405	OK	OK	OK
16층	4.5	0.03217	0.00715	NG	OK	OK
17층	4.5	0.03070	0.00682	NG	OK	OK
최종 성능수준 : 인명안전						

Table 30 El Centro 지진 100%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과

층수	층고(M)	층간변위(M)	층간변형각(θ)	IO	LS	CP
1층	6.0	0.00086	0.00014	OK	OK	OK
2층	6.0	0.00227	0.00038	OK	OK	OK
3층	6.0	0.00188	0.00031	OK	OK	OK
4층	6.0	0.01247	0.00208	OK	OK	OK
5층	6.0	0.01771	0.00295	OK	OK	OK
6층	6.0	0.01933	0.00322	OK	OK	OK
7층	6.0	0.02094	0.00349	OK	OK	OK
8층	6.0	0.02163	0.00361	OK	OK	OK
9층	6.0	0.02438	0.00406	OK	OK	OK
10층	6.0	0.02572	0.00429	OK	OK	OK
11층	6.0	0.02839	0.00473	OK	OK	OK
12층	6.0	0.02946	0.00491	OK	OK	OK
13층	6.0	0.03272	0.00545	OK	OK	OK
14층	4.0	0.02239	0.00560	NG	OK	OK
15층	3.0	0.02703	0.00901	NG	OK	OK
16층	4.5	0.06198	0.01377	NG	OK	OK
17층	4.5	0.06078	0.01351	NG	OK	OK

최종 성능수준 : 인명안전

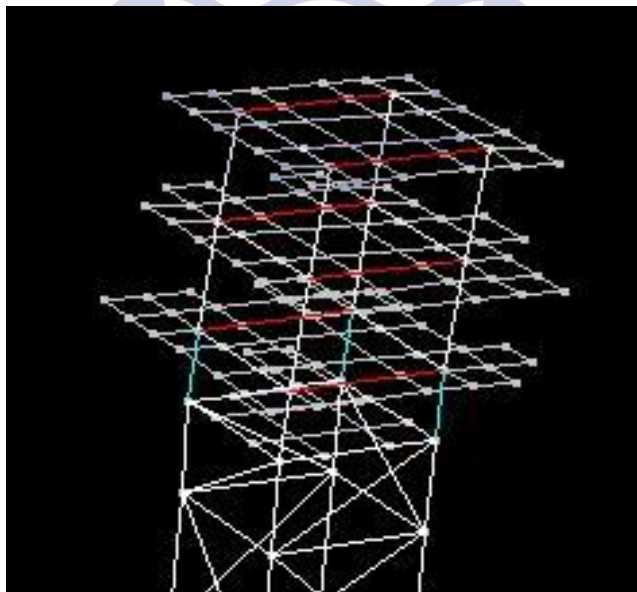


Fig. 32 Elcentro 100% 지진 파괴메커니즘

4.5.3 Elcentro 지진파에 대한 해석결과

기본모델과 보강모델해석결과 기존시설물의 내진성능평가 요령에 따른 구조물의 시스템에 대한 평가는 Table 26,27,29,30과 같이 목표수준에 해당하는 인명안전 수준이 확보되었기 때문에 상세평가는 실시하지 않고 판정법에 따른 결과 구조물이 목표성능에 준하여 내진보수/보강에 의해 기능수행 할 것으로 평가된다.

Perform 3-D의 Limit states 옵션으로 파괴메커니즘을 분석한 결과는 Fig. 27,32와 같고 자켓구조물의 부재별 상태를 표시한 결과 상부에서 수평부재들이 붉은색으로 표시되며 일부 항복하는 것으로 나타났고 내진성능 평가결과 인명 안전 수준을 확보한 것을 확인할 수 있었다.

4.6 예제구조물의 Mexico 지진파에 대한 해석 및 결과

4.6.1 기본모델의 해석

Mexico 지진파에 대한 구조물의 층변위와 층하중은 Fig. 33,34 최상층의 시간 변위응답 그래프는 Fig 35,36에 나타내었다. 비선형 동적해석의 신뢰성을 위해서 적용지진파를 50%수준에 대해서도 해석을 수행하였다.

해석결과는 Table 31과 같고 최대층간 변형각은 각각 1/48, 1/25로 일본건축 센터의 고층건축물평정에 사용하는 기준인 1/80이하를 만족하지 못하고 있다. 내진성능평가 결과는 모두 붕괴위험수준으로 나타났다.

Table 31 기본모델의 Mexico 지진파 해석결과

적용지진파	최대층간 변형각(rad)	내진성능평가 성능수준	부재상태 확인
Mexico 50%	1/48	붕괴위험수준	상부수평부재 국부파괴
Mexico 100%	1/25	붕괴위험수준	상부수평부재 국부파괴

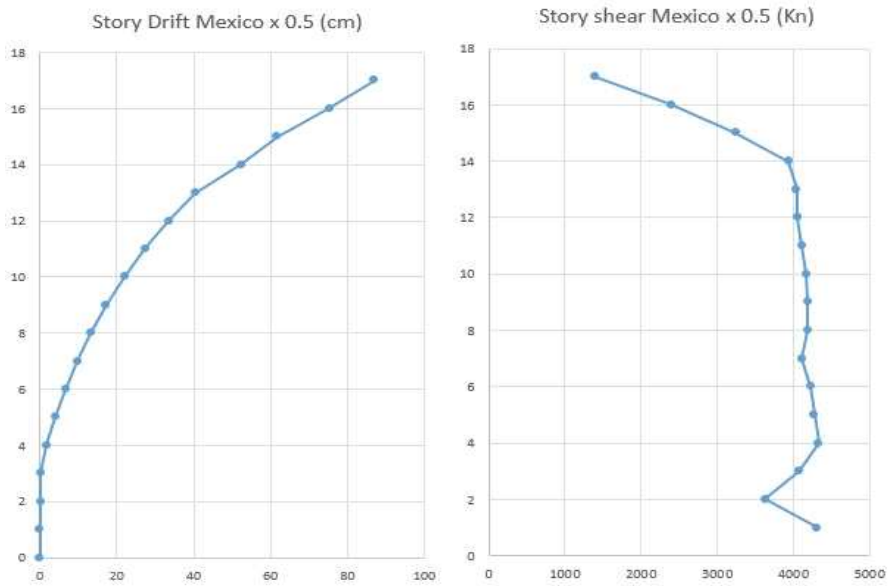


Fig. 33 Mexico 50% 지진파에 대한 층변위와 층하중

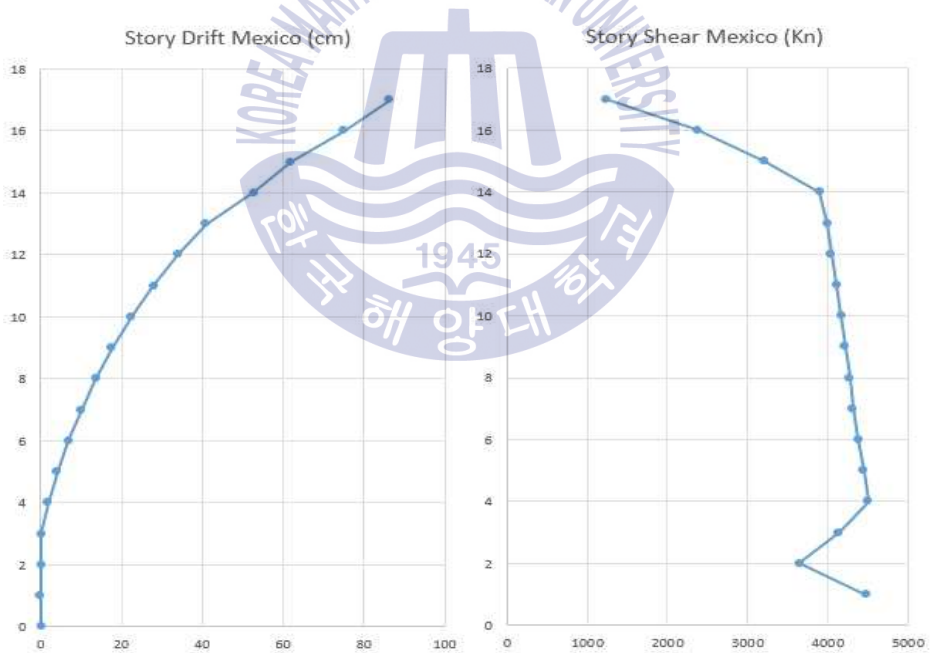


Fig. 34 Mexico 100% 지진파에 대한 층변위와 층하중

Mexico 0.5

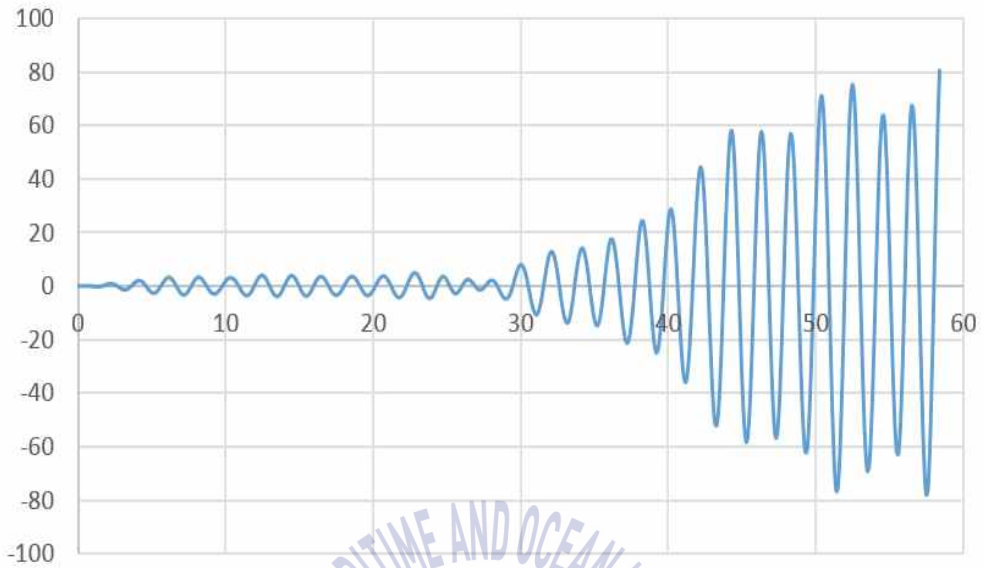


Fig. 35 Mexico 50% 지진파에 대한 기본모델 최상층의 변위(cm)응답

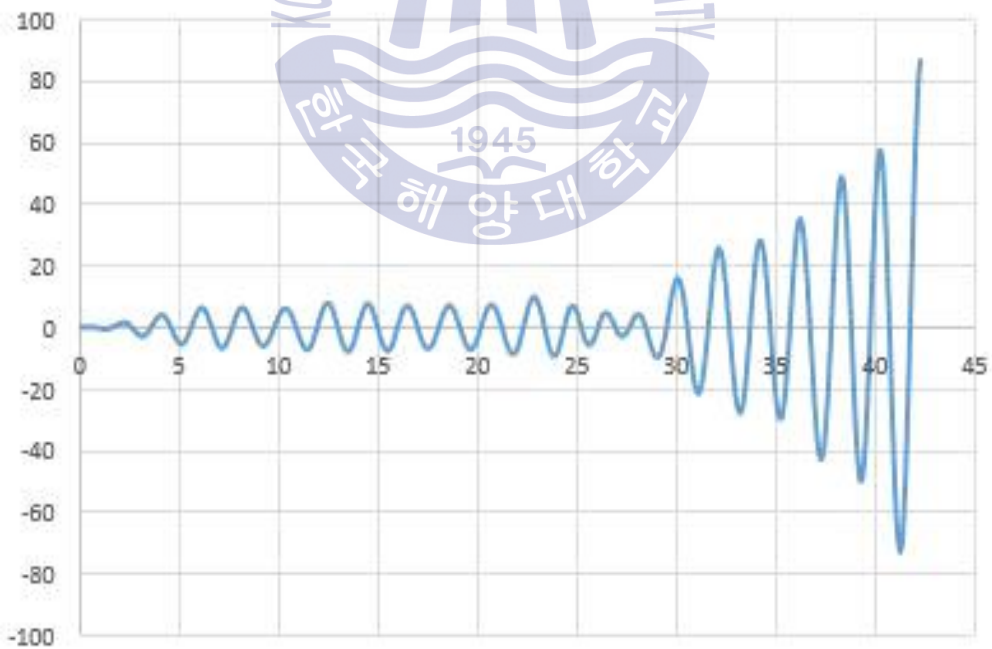


Fig. 36 Mexico 100% 지진파에 대한 기본모델 최상층의 변위(cm)응답

Table 32 Mexico지진 50%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과

층수	층고(M)	층간변위(M)	층간변형각(θ)	IO	LS	CP
1층	6.0	0.000627	0.00010	OK	OK	OK
2층	6.0	0.001049	0.00017	OK	OK	OK
3층	6.0	0.000635	0.00011	OK	OK	OK
4층	6.0	0.015147	0.00252	OK	OK	OK
5층	6.0	0.022499	0.00375	OK	OK	OK
6층	6.0	0.026949	0.00449	OK	OK	OK
7층	6.0	0.030907	0.00515	OK	OK	OK
8층	6.0	0.034693	0.00578	NG	OK	OK
9층	6.0	0.04014	0.00669	NG	OK	OK
10층	6.0	0.04826	0.00804	NG	OK	OK
11층	6.0	0.05313	0.00886	NG	OK	OK
12층	6.0	0.0619	0.01032	NG	OK	OK
13층	6.0	0.06927	0.01155	NG	OK	OK
14층	4.0	0.11756	0.02939	NG	NG	OK
15층	3.0	0.09417	0.03139	NG	NG	OK
16층	4.5	0.13551	0.03011	NG	NG	OK
17층	4.5	0.11727	0.02606	NG	NG	OK

최종 성능수준 : 붕괴방지

Table 33 Mexico지진 100%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과

층수	층고(M)	층간변위(M)	층간변형각(θ)	IO	LS	CP
1층	6.0	0.0006	0.00009	OK	OK	OK
2층	6.0	0.0009	0.00016	OK	OK	OK
3층	6.0	0.0006	0.00010	OK	OK	OK
4층	6.0	0.0162	0.00270	OK	OK	OK
5층	6.0	0.0234	0.00390	OK	OK	OK
6층	6.0	0.0277	0.00461	OK	OK	OK
7층	6.0	0.0315	0.00525	OK	OK	OK
8층	6.0	0.0353	0.00588	NG	OK	OK
9층	6.0	0.0399	0.00665	NG	OK	OK
10층	6.0	0.0494	0.00823	NG	OK	OK
11층	6.0	0.0533	0.00888	NG	OK	OK
12층	6.0	0.0609	0.01015	NG	OK	OK
13층	6.0	0.0698	0.01163	NG	OK	OK
14층	4.0	0.1177	0.02943	NG	NG	OK
15층	3.0	0.0928	0.03093	NG	NG	OK
16층	4.5	0.1305	0.02900	NG	NG	OK
17층	4.5	0.1131	0.02513	NG	NG	OK

최종 성능수준 : 붕괴방지

Table 34 Mexico지진 50%에 층 부재별 상세평가 결과

층수	IO	LS	CP
1층	OK	OK	OK
2층	OK	OK	OK
3층	OK	OK	OK
4층	NG	OK	OK
5층	NG	OK	OK
6층	NG	OK	OK
7층	NG	OK	OK
8층	NG	OK	OK
9층	NG	OK	OK
10층	NG	NG	OK
11층	NG	NG	OK
12층	NG	NG	NG
13층	NG	NG	NG
14층	NG	NG	NG
15층	NG	NG	NG
16층	NG	NG	NG
17층	NG	NG	NG
최종 성능수준 : 붕괴위험			

Table 35 Mexico지진 100%에 층 부재별 상세평가 결과

층수	IO	LS	CP
1층	OK	OK	OK
2층	OK	OK	OK
3층	OK	OK	OK
4층	NG	OK	OK
5층	NG	OK	OK
6층	NG	OK	OK
7층	NG	OK	OK
8층	NG	OK	OK
9층	NG	OK	OK
10층	NG	NG	OK
11층	NG	NG	OK
12층	NG	NG	OK
13층	NG	NG	NG
14층	NG	NG	NG
15층	NG	NG	NG
16층	NG	NG	NG
17층	NG	NG	NG
최종 성능수준 : 붕괴위험			

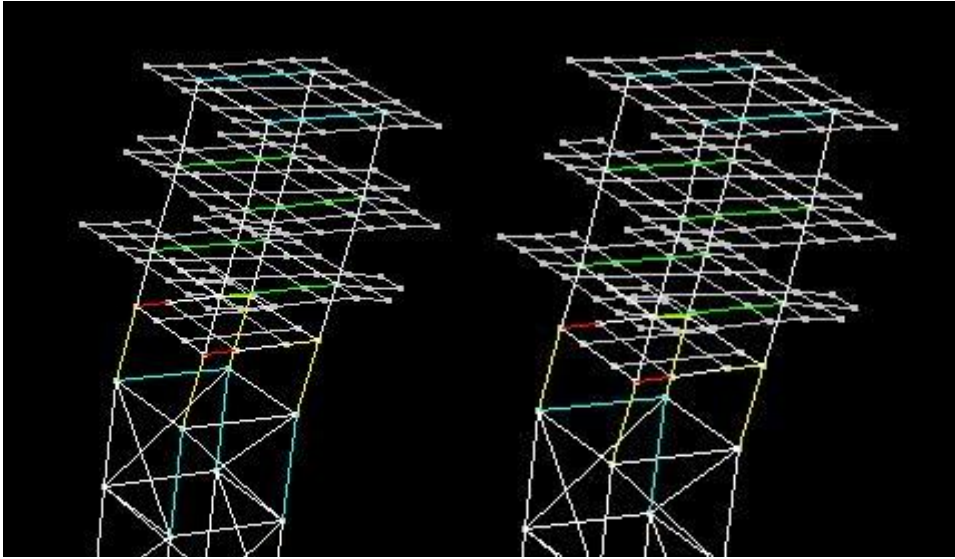


Fig. 37 Mexico 50% 지진
파괴메커니즘

Fig. 38 Mexico 100% 지진
파괴메커니즘

4.6.2 보강모델의 해석

Mexico 지진파에 대한 보강모델의 층변위와 층하중은 Fig. 39,40 최상층의 시간변위응답 그래프는 Fig 41,42에 나타내었다. 비선형 동적해석의 신뢰성을 위해서 적용지진파를 50%수준에 대해서도 해석을 수행하였다.

해석결과는 Table 36과 같고 최대층간 변형각은 각각 1/50, 1/25로 일본건축센터의 고층건축물평정에 사용하는 기준인 1/80이하를 만족하지 못하고 있다. 내진성능평가 결과는 모두 붕괴위험수준을 타나났다.

Table 36 보강모델의 Mexico 지진파 해석결과

적용지진파	최대층간 변형각(rad)	내진성능평가 성능수준	부재상태 확인
Mexico 50%	1/50	붕괴위험수준	상부수평부재 항복
Mexico 100%	1/25	붕괴위험수준	상부수직부재 국부파괴

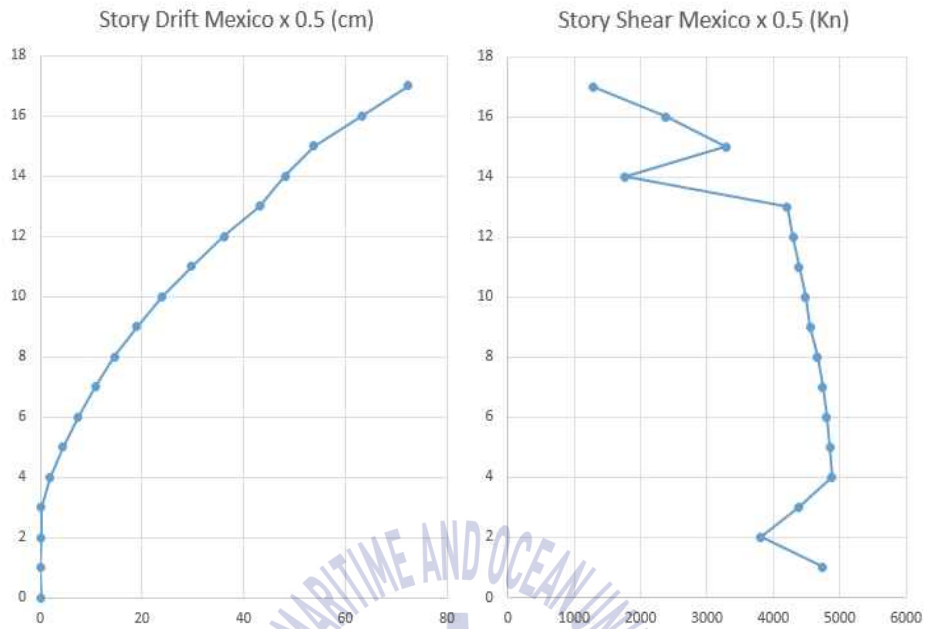


Fig. 39 Mexico 50% 지진파에 대한 층변위와 층하중

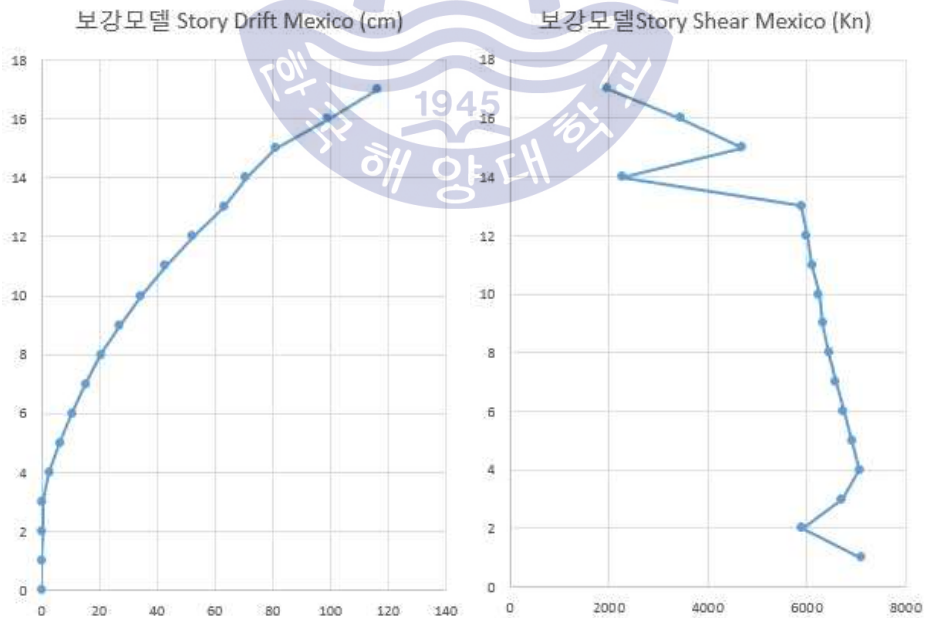


Fig. 40 Mexico 100% 지진파에 대한 층변위와 층하중

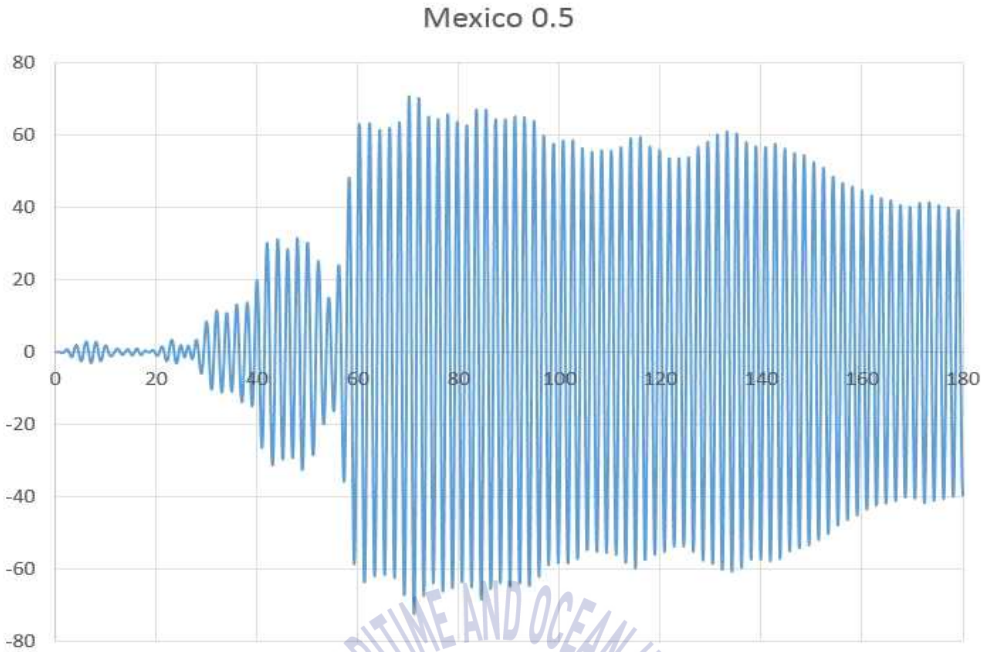


Fig. 41 Mexico 50% 지진파에 대한 보강모델 최상층의 변위(cm)응답

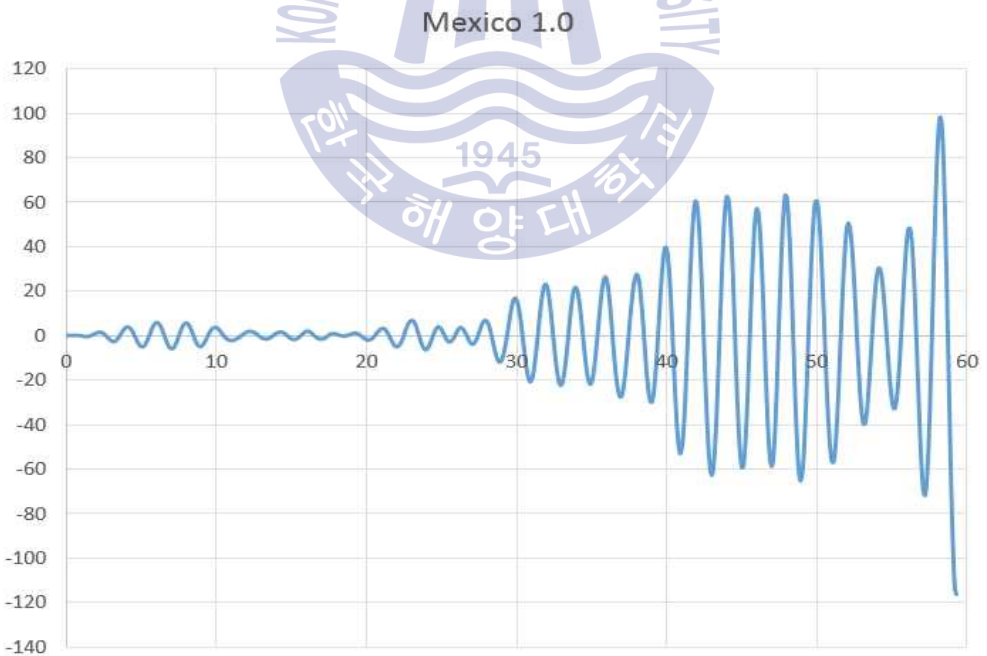


Fig. 42 Mexico 100% 지진파에 대한 보강모델 최상층의 변위(cm)응답

Table 37 Mexico지진 50%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과

층수	층고(M)	층간변위(M)	층간변형각(θ)	IO	LS	CP
1층	6.0	0.00074	0.00012	OK	OK	OK
2층	6.0	0.00099	0.00016	OK	OK	OK
3층	6.0	0.00061	0.00010	OK	OK	OK
4층	6.0	0.01707	0.00284	NG	OK	OK
5층	6.0	0.02541	0.00424	OK	OK	OK
6층	6.0	0.02968	0.00495	OK	OK	OK
7층	6.0	0.03402	0.00567	NG	OK	OK
8층	6.0	0.03729	0.00622	NG	OK	OK
9층	6.0	0.04415	0.00736	NG	OK	OK
10층	6.0	0.05041	0.00840	NG	OK	OK
11층	6.0	0.05728	0.00955	NG	OK	OK
12층	6.0	0.06342	0.01057	NG	OK	OK
13층	6.0	0.07061	0.01177	NG	OK	OK
14층	4.0	0.05027	0.01257	NG	OK	OK
15층	3.0	0.05584	0.01861	NG	OK	OK
16층	4.5	0.09611	0.02136	NG	NG	OK
17층	4.5	0.08954	0.01990	NG	OK	OK

최종 성능수준 : 붕괴방지

Table 38 Mexico지진 100%에 대한 층간변형각 성능수준 판별 결과

층수	층고(M)	층간변위(M)	층간변형각(θ)	IO	LS	CP
1층	6.0	0.00081	0.000136	OK	OK	OK
2층	6.0	0.00165	0.000275	OK	OK	OK
3층	6.0	0.00105	0.000176	OK	OK	OK
4층	6.0	0.02424	0.004039	OK	OK	OK
5층	6.0	0.03583	0.005972	NG	OK	OK
6층	6.0	0.04180	0.006967	NG	OK	OK
7층	6.0	0.04772	0.007953	NG	OK	OK
8층	6.0	0.05216	0.008693	NG	OK	OK
9층	6.0	0.06531	0.010885	NG	OK	OK
10층	6.0	0.07343	0.012238	NG	OK	OK
11층	6.0	0.08492	0.014153	NG	OK	OK
12층	6.0	0.09441	0.015735	NG	OK	OK
13층	6.0	0.10798	0.017997	NG	OK	OK
14층	4.0	0.07673	0.019183	NG	NG	OK
15층	3.0	0.10207	0.034023	NG	NG	OK
16층	4.5	0.18110	0.040244	NG	NG	NG
17층	4.5	0.16994	0.037764	NG	NG	OK

최종 성능수준 : 붕괴위험

Table 39 Mexico지진 50%에 층 부재별 상세평가 결과

층수	IO	LS	CP
1층	OK	OK	OK
2층	OK	OK	OK
3층	OK	OK	OK
4층	NG	OK	OK
5층	NG	OK	OK
6층	NG	OK	OK
7층	NG	OK	OK
8층	NG	OK	OK
9층	NG	OK	OK
10층	NG	NG	OK
11층	NG	NG	OK
12층	NG	NG	NG
13층	NG	NG	NG
14층	NG	NG	NG
15층	NG	NG	NG
16층	NG	NG	NG
17층	NG	NG	NG
최종 성능수준 : 붕괴위험			

Table 40 Mexico지진 100%에 층 부재별 상세평가 결과

층수	IO	LS	CP
1층	OK	OK	OK
2층	OK	OK	OK
3층	OK	OK	OK
4층	NG	OK	OK
5층	NG	OK	OK
6층	NG	OK	OK
7층	NG	NG	OK
8층	NG	NG	OK
9층	NG	NG	OK
10층	NG	NG	NG
11층	NG	NG	NG
12층	NG	NG	NG
13층	NG	NG	NG
14층	NG	NG	NG
15층	NG	NG	NG
16층	NG	NG	NG
17층	NG	NG	NG
최종 성능수준 : 붕괴위험			

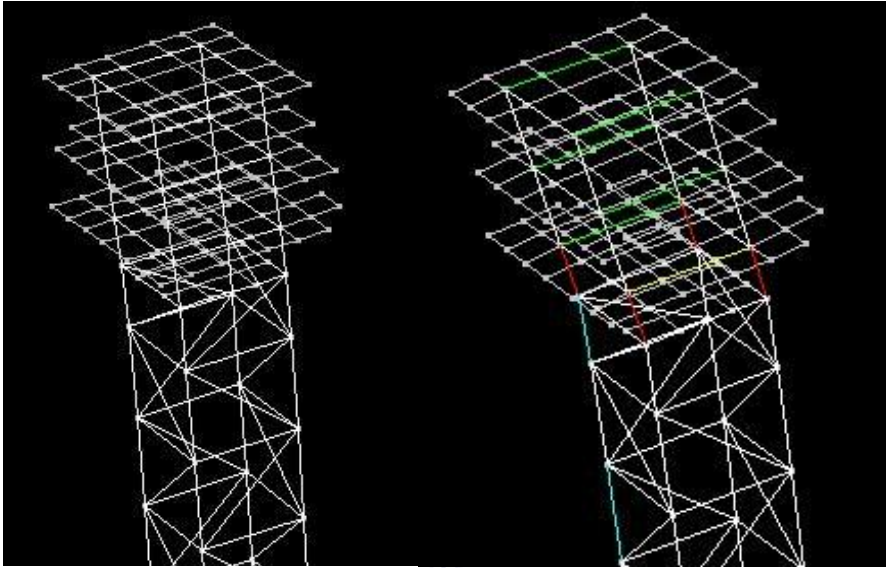


Fig. 43 Mexico 50% 지진
파괴메커니즘

Fig. 44 Mexico 100% 지진
파괴메커니즘

4.6.3 Mexico 지진파에 대한 해석결과

기본모델의 해석결과 기존시설물의 내진성능평가 요령에 따른 구조물의 시스템에 대한 평가는 Table 32,33과 같고 평가결과가 붕괴방지수준으로 판정법에 따라 철거 혹은 보강 조치가 나왔기 때문에 상세평가 실시하였고 그 결과를 Table 34,35에 정리하였다. 상세평가결과 최종 성능수준은 붕괴위험인 것으로 판별되었으며 경제성분석에 의해 전체 구조의 성능개량이나 철거를 판단하고, 성능개량 판정 시에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 전면적으로 개량하여 내진성능을 향상하는 것으로 조치가 필요하다.

기본모델을 Perform3-D의 Limit states 옵션으로 파괴메커니즘을 분석한 결과는 Fig. 37, 38과 같고 자켓구조물의 상부의 수평부재와 수직부재가 일부 항복하며 서서히 붕괴되는 것으로 나타났다. 붉은색으로 표시되는 부재들이 항복한 부재들이고 내진성능 평가결과 붕괴위험 수준인 것을 확인할 수 있었다.

보강모델의 해석결과 기존시설물의 내진성능평가 요령에 따른 구조물의 시스템에 대한 평가는 Table 37,38과 같고 붕괴방지수준과 붕괴로 판정법에 따라

철거 혹은 보강 조치가 나왔기 때문에 상세평가 실시하였고 그 결과를 Table 35,36에 정리하였다. 상세평가결과 층 부재별 최종 성능수준은 붕괴위험인 것으로 판별되었으며 기본모델과 같은 해석결과가 나왔다.

보강모델의 Perform3-D의 Limit states 옵션으로 파괴메커니즘을 분석한 결과는 Fig. 43, 44와 같고 Mexico 100%지진 해석결과는 기본모델과 같이 자켓구조물의 상부 수평부재와 수직부재가 항복하며 서서히 붕괴되었고 보강효과가 없는 것으로 나타났고 내진성능 평가결과 붕괴위험 수준인 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Mexico 50%지진 해석결과의 경우 자켓구조물의 상부수평부재가 항복하였지만 IO수준을 넘는 부재는 없는 것으로 확인 되며 이는 즉시거주수준의 성능수준으로 판별된다. 이와 같이 소성회전각으로 판별하는 내진성능평가 요령과 실질적 거동으로 나타나는 비선형동적해석과의 차이가 나타나는 부분을 확인할 수 있었다.

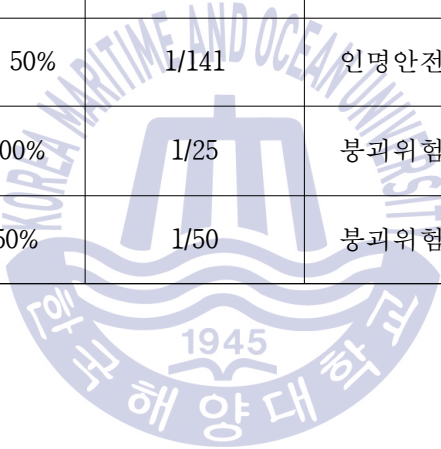
4.7 모델링별 지진파에 대한 성능평가

기본모델과 Brace보강모델에 대한 지진하중별 해석결과를 정리하면 다음 Table 41과 같다. Pushover해석결과에서 지진파에 대해 취약할 것으로 예상되었던 자켓구조물은 비선형 동적해석결과 El Centro 지진파에 대해서는 인명안전수준의 내진성능을 확보하였다. El Centro지진파의 해석결과를 비교해보았을 때 기본모델과 보강모델의 성능수준은 동일하게 나타났고 최상층의 변위차이가 크지 않은 것으로 보아 보강효과가 없는 것으로 나타났다.

Mexico 지진파에 대해서는 붕괴위험수준으로 자켓구조물의 고유진동수와 비슷한 장주기파에 매우 취약하다는 결과를 확인 할 수 있었다. 또한 Mexico 50% 지진파의 해석결과를 비교해보았을 때 기본모델은 부재의 국부파괴가 일어났으나 보강모델은 일부부재의 항복이 일어났지만 부재국부파괴가 일어나지 않고 지진파에 저항하며 보강효과가 나타나는 결과를 확인 할 수 있었다.

Table 41 모델링별 지진하중해석 결과

모델	지진하중	최대층간 변형각(rad)	내진성능수준	파괴메커니즘 확인
기본 모델	El Centro 100%	1/71	인명안전수준	상부수평부재 항복
	El Centro 50%	1/102	인명안전수준	상부수평부재 항복
	Mexico 100%	1/25	붕괴위험수준	상부수평부재 국부파괴
	Mexico 50%	1/48	붕괴위험수준	상부수평부재 국부파괴
Brace 보강모델	El Centro 100%	1/77	인명안전수준	상부수평부재 항복
	El Centro 50%	1/141	인명안전수준	상부수평부재 항복
	Mexico 100%	1/25	붕괴위험수준	상부수직부재 국부파괴
	Mexico 50%	1/50	붕괴위험수준	상부수평부재 항복



제 5 장 결 론

본 논문에서는 해양자켓 구조물에 대한 푸쉬오버해석 및 비선형 동적해석을 실시하여 구조물의 환경하중에 대한 안전성 및 거동을 분석하였다. 모델링에 풍, 파랑, 조류, 지진하중에 대한 푸쉬오버해석과 지진파를 이용한 비선형 동적 해석을 수행하고 그 결과를 각각 RSR값을 통해 손상도 평가로 나타내고 지진파에 대한 최상층의 변위응답그래프, 성능수준에 대한 내진성능평가를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 상용해석 프로그램인 MIDAS Gen과 지진해석 프로그램인 Perform 3-D를 이용하여 예제 자켓구조물을 모델링하고 각각 푸쉬오버해석과 비선형동적해석을 수행하여 안전성 및 거동을 분석하였다.

2) Pushover 해석결과 풍, 파랑, 조류에 대해서는 구조물이 안정적인 거동을 하였고 RSR 값은 2.56으로 손상도 등급이 middle로 나왔지만 지진하중에 대한 pushover 해석결과 상부구조물에 하중이 많이 작용하여 Leg부재가 붕괴되어 지진하중에 대해 취약한 거동을 나타냈고 RSR값이 1.633으로 손상도 등급이 high로 나타났다.

3) 지진하중에 취약함을 알아보기 위해 비선형 동적해석을 실시한 결과 El centro 지진파에는 안정적이 거동을 보였지만 Mexico 지진에 대해서는 공진이 발생하며 매우 취약하게 나타났으며 구조물이 전체적인 소성거동을 일으키지 못하고 응력집중현상으로 일부부재가 국부파괴메커니즘이 발생하였다.

4) Mexico 지진파에 대한 소성거동을 알아보기 위해 Brace를 보강한 모델에 대해서 해석을 실시하였고 그 결과 Mexico 지진가속도의 50%수준에서는 소성 변형이 일어나나 구조물이 붕괴되지 않고 즉시거주수준의 내진성능을 확보하는 것으로 나타났다.

5) 지진해석을 통해서 예제구조물이 장주기파에 취약한 모습을 나타내는 것

을 알 수 있었고 구조물의 안전성확보를 위해 brace로 보강하는 것이 바람직해 보인다.

본 연구는 자켓구조물의 비선형 동적해석을 실시하고 안전성평가를 실시하였으며, 추후 다양한 지진하중에 대한 비선형해석기법의 연구와 국내에도 자켓구조물과 같은 해양구조물에 대한 내진성능을 평가하는 기준을 마련하는 연구가 필요하다.



참고문헌

1. 신상학, 2008, *자켓형 해양 구조물의 동적거동에 대한 민감도 연구*, 석사학위논문.
인천:인하대학교
2. 김건우, 송진규, 2005, *고차모드 영향이 반영된 Pushover 해석을 위한 횡하중 분배계수 제안*, 한국지진공학회 2005년도 학술대회 논문집.
3. 최한식, 심재설, 최병렬, 민인기, 2005, *자켓구조물의 지진해석과 비선형 신간영역 PUSHOVER해석의 비교*, 대한토목학회 2005년도 학술대회, pp.730-733
4. Computers & Structures, Inc. *Perform-3d Getting Started*, 2006
5. Computers & Structures, Inc. *Perform-3d User Guide*, 2006
6. Computers & Structures, Inc. *Perform Components and Elements*, 2006
7. 해양수산부, 2007, *종합 해양과학기지 구축 및 활용연구 최종보고서*.
8. 한국선급, 2013, *고정식 해양구조물 규칙*, 한국선급
9. 이주선, 1997, *저온해역에서의 해양구조물에 대한 구조신뢰성 해석*, 한국해안·해양공학회지, 제11권 2호, pp.8-19
10. FEMA, 2005, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, ATC, Washington, DC
11. API, 2008, *Recommended Practice for the Structural Integrity Management of Fixed Offshore Structures*, API Recommended Practice 2SIM.2008, Washington, DC
12. Huilong, R. Yitao, W. Chenfeng, L. Jiaju, Y. & Bingbing, C., 2014, *Risk Based Inspection Plan Combined with Fatigue Failure Analysis for Jacket Platform*, Vol 24st. ISOPE

13. Park, J.S. Kang, K.R. Kang, H.S. & Kim, Y.H., 2013, *Projection of the Future Wave Climate Changes Over the Western North Pacific*, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 25(5)
14. Suh, K.D. Kim, S.W. Nobuhito, M. & Hagime, M., 2011, *Time-dependent Performance-based Design of Caisson Breakwater Considering Climate Change Impacts*, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(3)
15. CNOOC, 2000, *Jacket Design Report CTR025*, Tian Jin
16. 영양순 등, 1999, *구조신뢰성공학*, 서울대학교 출판부
17. DNV, 1995, *Guideline for offshore structure reliability analysis-General of DNV*, Norway, Oslo
18. Behrouz, A. & Ali, A.A., 2004, *Nonlinear Daynamic Analysis of Jacket type Offshore Structures Subjected to Earthquake Using Fiber Elements*, World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004 pp.1726

