



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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

부유식 구조물의 구조 건전성 및 잔존수명
평가에 관한 연구

Study on Structural Integrity and Residual Life
Assessment of Floating Structure



지도교수 박수용

2016년 7월

한국해양대학교 대학원

해양건축공학과

천세용

본 논문을 천세용의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 송 화 철 (인)

위 원 박 수 용 (인)

위 원 오 광 석 (인)



2016년 6월 29일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	viii

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 동향	3
1.3 연구 범위와 내용	3

2. 부유식 구조 시스템

2.1 개요	6
2.2 부유식 구조물 하부부체에 따른 분류	6
2.2.1 폰툰식	6
2.2.2 반잠수식	7
2.2.3 공기안정식	8
2.2.4 연착저식	9
2.3 계류방식	10
2.3.1 이완 계류	10
2.3.2 돌핀 계류	11

2.3.3 인장각식 계류	12
2.2.4 안벽 계류	13
2.4 부유식 구조물의 주요 하중	13
2.4.1 고정하중	13
2.4.2 활하중	14
2.4.3 파랑하중	14
3. 이론적 배경	
3.1 개요	20
3.2 플레이트 손상탐지 이론	21
3.3 손상위치 추정기법	23
3.4 구조계 추정기법	25
3.5 피로해석 이론 및 기준	30
3.6 누적손상법	36
4. 부유식 구조물의 동적특성 추출	
4.1 대상구조물 개요	38
4.2 현장실험을 통한 부유식 구조물의 동적특성 추출	39
4.2.1 현장실험 개요	39
4.2.2 강제진동시험 - PP기법	42
4.2.3 상시진동시험 - FDD기법	43
4.2.4 동적특성 추출	44

4.3 수치해석을 통한 부유식 구조물의 동적특성 추출	49
4.3.1 수치해석 개요	49
4.3.2 수치해석 모델링	50
4.3.2 고유치 해석	53
5. 부유식 구조물의 손상탐지 및 유효물성치 추정	
5.1 개요	54
5.2 부유식 구조물의 손상탐지	55
5.3 유한요소모델 수립 과정을 통한 유효물성치 추정	58
6. 부유식 구조물의 잔존수명 평가	
6.1 개요	62
6.2 파랑하중에 의한 부유식 구조물의 구조해석	62
6.3 부유식 구조물의 피로해석	73
6.4 부유식 구조물의 잔존수명 예측	78
7. 결론	79
참고문헌	81

List of Tables

Table 1 Extent of damage in relation with the main event	2
Table 2 Relationship of depth, frequency, wavelength and allium	19
Table 3 Exposure classes related to environmental conditions	33
Table 4 Value according to the level of stress variations	35
Table 5 Material Coefficients for Concrete and Reinforcement	35
Table 6 Limit of cumulative damage ratios	37
Table 7 Change of natural frequency	49
Table 8 Structure specification	52
Table 9 Comparing the natural frequencies of the field test and numerical analysis	53
Table 10 System Identification result of 2012 year	58
Table 11 System Identification result of 2013 year	58
Table 12 System Identification result of 2014 year	59
Table 13 System Identification result of 2016 year	59
Table 14 Wave data according to the return period	63
Table 15 Maximum stress and shear force according to the wave	72
Table 16 Wave scatter diagram for the World Wide trade	77
Table 17 Residual Life assessment of floating structure	78

List of Figures

Fig. 1 Flowchart of study	5
Fig. 2 Structural configuration of pontoon	7
Fig. 3 Structural configuration of semi-submersible	7
Fig. 4 Pneumatically stabilized platforms cell array	8
Fig. 5 Conceptual layout of a soft landing type structure	9
Fig. 6 Chain mooring	10
Fig. 7 Dolphin mooring	11
Fig. 8 Tension leg mooring system	12
Fig. 9 Quay Wall Mooring System	13
Fig. 10 Definition of regular wave	16
Fig. 11 Motion of water molecules according to relative depth	18
Fig. 12 Probability density function	24
Fig. 13 Flowchart of damage detection	25
Fig. 14 Flowchart of system identification	29
Fig. 15 S-N curve	31
Fig. 16 Flowchart of residual life assessment	37
Fig. 17 Location plan	38
Fig. 18 Side elevation	38
Fig. 19 Changed structure location	39

Fig. 20 Floating structure view	39
Fig. 21 Testing equipment	40
Fig. 22 Modal test configuration	41
Fig. 23 Modal Impact Test	42
Fig. 24 Natural frequency & mode shape in 2012 year	45
Fig. 25 Natural frequency & mode shape in 2013 year	46
Fig. 26 Natural frequency & mode shape in 2014 year	47
Fig. 27 Natural frequency & mode shape in 2016 year	48
Fig. 28 Analysis process	50
Fig. 29 Structural drawing	51
Fig. 30 Numerical modelling	52
Fig. 31 Natural frequency & mode shape	53
Fig. 32 Crack drawing of test structure	55
Fig. 33 Result of Damage Detection	57
Fig. 34 Change of elastic modulus	61
Fig. 35 Change of compression strength	61
Fig. 36 Pressure distribution according to southwest wave	64
Fig. 37 Pressure distribution according to west wave	65
Fig. 38 Stress distribution according to southwest wave with 1 year return period	66
Fig. 39 Stress distribution according to southwest wave with 5 year return period	67

Fig. 40 Stress distribution according to southwest wave with 30 year return period	68
Fig. 41 Stress distribution according to west wave with 1 year return period	69
Fig. 42 Stress distribution according to west wave with 5 year return period	70
Fig. 43 Stress distribution according to west wave with 30 year return period	71
Fig. 44 Compressive stress S-N curve	73
Fig. 45 Tensile stress S-N curve	74
Fig. 46 Shear force S-N curve	74
Fig. 47 Compressive stress fatigue life of top slab	75
Fig. 48 Compressive stress fatigue life of bottom slab	75
Fig. 49 Tensile stress fatigue life of slab	76
Fig. 50 Shear force fatigue life of beam and column	76

Study on Structural Integrity and Residual Life Assessment of Floating Structure

Cheon, Se Yong

Department of Ocean Architectural Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

The purpose of this study is to present a structural integrity and residual life evaluation methodology of floating structures. The structural integrity has been appraised by a non-destructive damage evaluation method and a system identification method, and the residual life has been appraised utilizing cumulative damage rule for the fatigue induced by wave load.

By the methodology presented in this paper, it is possible to achieve the following two objectives. (1) The occurrence and growth of damage and stiffness degradation trend of the floating structure can be determined through the periodic measurement. As a result, the structure can be evaluated whether the structure satisfy performance criteria performance criteria and safety. (2) the fatigue damage induced by each waves is obtained from the estimated stiffness and numerical analysis of wave load, and the residual life can be predicted by summing algebraically the fatigue damage according to the probability of wave load.

KEY WORDS: Floating Structure 부유식 구조물; Dynamic Properties 동적 특성; Structural Integrity Assessment 구조 건전성 평가; Residual Life Assessment 잔존 수명평가

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

지구 표면의 70% 이상을 차지하고 있는 해양공간은 인구의 증가 및 산업화에 의한 환경오염, 자원의 고갈 등으로 인한 육상개발의 제한에 대한 대안으로 제시되고 있다. 해양은 생물자원, 광물자원, 에너지자원 등이 부존되어 있어 무수한 개발 가능성을 가지고 있다.

기존의 해양공간 개발은 매립식, 고정식 구조물이 주를 이루었지만 경제적·환경적 이유로 부유식 구조물의 비중이 점차 늘어나고 있다. 또한, 부유식 구조물은 지구온난화에 의한 해수면 상승 및 지진 등의 재해에도 효과적으로 대응할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 파랑하중 및 풍하중에 노출되어 지상 구조물에 비하여 손상이 발생하기 쉬우며, 사고 발생 시 막대한 경제적·환경적 피해가 발생할 수 있다.

Table 1은 DNV의 WOAD(World offshore accident database)에서 1970년에서 2009년까지의 해양플랜트에서 발생한 사고를 발생 유형별로 정리한 통계이다 (Christou & Konstantinidou, 2012). 해양플랜트에서 발생한 경미한 사고는 화재 및 유출, 낙하에 의한 사고발생이 주로 나타나며, 중대한 사고의 경우 파손 및 피로에 의한 사고가 높게 나타나고 있다.

파손 및 피로에 의한 사고는 구조물의 상시 모니터링에 의해 구조물에 발생한 이상을 진단하고 적절한 조치를 취하고, 잔존수명 평가에 따라 노후화된 설비의 보수, 교체 및 폐기를 했다면 충분히 사고를 미연에 방지할 수 있었을 것으로 예상된다.

Table 1 Extent of damage in relation with the main event

Main Event	Insignificant	Minor	Severe	Significant
Anchor/mooring failure	37	45	0	37
Blowout	138	54	6	27
Breakage or fatigue	21	54	96	197
Capsizing, overturn, toppling	1	0	191	5
Collision, not offshore units	45	50	42	63
Collision, offshore units	61	136	26	111
Crane accident	67	20	0	5
Explosion	46	34	10	28
Falling load / Dropped object	879	69	14	74
Fire	592	132	86	100
Grounding	2	10	21	29
Helicopter accident	30	27	0	0
Leakage into hull	5	11	5	24
List, uncontrolled inclination	9	9	14	28
Loss of buoyancy or sinking	0	1	35	3
Machinery/propulsion failure	13	9	0	1
Other	192	36	41	13
Out of position, adrift	32	15	2	5
Release of fluid or gas	1047	132	125	40
Towline failure/rupture	53	1	3	2
Well problem, no blowout	211	14	0	8

따라서 부유식 구조물의 모니터링을 통해 구조물에 발생한 손상 및 강성저하를 파악하여 적절한 조치를 취하여 건전성 및 안전성을 확보하여야 하며, 부유식 구조물에 반복적으로 작용하는 파랑하중 및 풍하중에 의한 피로손상도를 분석하여 잔존수명에 대한 정량적인 평가를 제시할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 부유식 구조물의 구조 건전성 및 잔존수명을 평가를 위해서 부유식 구조물의 주기적 계측을 수행하였으며, 각 계측 시점의 동적 특성을 추출하여 손상탐지 기법 및 구조계 추정기법을 적용하여 손상의 발생 및 진전,

구조물의 강성 저하 추이 분석을 통해 구조 건전성을 평가하였다. 또한 부유식 구조물 설치해역의 환경하중에 대한 구조해석을 통해 구조물 내의 응력분포를 구하고 부유식 구조물의 계측 시점의 강성을 적용하여 피로해석을 수행하였으며, 누적손상법을 적용하여 잔존수명을 평가하였다.

1.2 연구 동향

부유식 구조물에 대한 관심이 높아지면서 다양한 분야에서 연구개발이 이루어지고 있다. 특히 구조분야의 연구는 계류장치의 설계, 파랑하중에 대한 설계 부재력 산정, 상부구조체에 대한 동적응답해석 등으로 한정되어 연구되고 있으나 구조물의 건전성 평가를 위한 연구는 부족한 실정이다.

부유식 구조물의 건전성 평가가 이루어진 최근 연구사례로 김민진(2012)은 콘크리트 축소모형 실험을 통하여 손상탐지 기법의 검증에 하였다. 또한, 실제 부유식 구조물에 대하여 현장실험을 실시하여 유효물성치를 추정하여 구조계 추정기법의 적용성을 검증하였다. 실제 부유식 구조물의 건전성 평가를 수행한 연구사례로 단일 시점에 대한 건전성 평가를 수행하였기 때문에 주기적인 계측을 통한 손상의 진전 및 강성저하 추이 분석에 대한 연구가 필요하다.

해양 구조물의 피로해석에 대한 연구 사례로 정현(2005)은 해상 부유식 마리나 설계를 위해 API(1978) 및 DNV(1977)의 설계기준에 따른 피로수명 검토를 실시하였고, 김민중(2011)은 해양콘크리트의 염해 및 피로신뢰성에 의한 생애주기비용 분석을 위하여 케이슨 방파제 구조물의 피로해석을 수행하였다. 하지만 계류 설비 및 고정식 구조물에 대해서 피로해석을 수행한 연구 사례였으며, 부유식 구조물의 피로에 의한 잔존수명에 대한 연구는 전무하였다. 따라서 환경하중에 의한 부유식 구조물의 피로해석 및 잔존수명에 관한 연구가 필요하다.

1.3 연구 범위와 내용

본 논문에서는 부유식 구조물의 주기적인 계측을 통하여 동적특성을 추출하고 초기 계측시점과 각 계측시점의 동적특성의 차이를 이용하여 손상탐지를 수

행하였으며, 대상 구조물의 수치해석 모델을 작성하고 구조계 추정기법을 이용하여 각 계측시점의 유효물성치를 추정하여 구조적 건전성과 안전성을 평가하였다. 또한 대상 구조물의 잔여수명 평가를 위해 수치해석 모델에 해양환경하중을 적용하고 구조해석을 수행하여 대상 구조물의 응력 분포를 계산하였으며, 해양 콘크리트 구조물의 피로성능 기준에 근거하여 피로수명을 분석하였다.

본 논문의 순서는 다음과 같다.

제 1 장에서는 부유식 구조물의 건전성 및 잔여수명 평가하기 위한 연구 배경 및 목적과 국내외 연구 동향 및 본 논문의 연구 방향을 제시하였다.

제 2 장에서는 부유식 구조물에 건전성 및 잔여수명 평가기법의 적용을 위하여 부유식 구조물의 분류, 계류 방식의 분류 및 부유식 구조물에 작용하는 주요하중에 대하여 기술하였다.

제 3 장에서는 연구 수행을 위한 이론적 배경으로 손상탐지 기법, 구조계 추정기법 그리고 피로해석 방법 및 기준의 이론적 내용과 절차를 기술하였다.

제 4 장에서는 실제 부유식 구조물에서의 주기적 계측을 통한 동적특성 추출 과정과 대상 구조물의 수치해석 모델작성 및 모달 해석을 통한 동적특성 추출 절차를 기술하였다.

제 5 장에서는 부유식 구조물의 현장실험 및 수치해석을 통하여 추출한 동적 특성을 이용한 손상탐지 및 유효물성치 추정 과정을 기술하였다.

제 6 장에서는 부유식 구조물에 작용하는 해양환경하중에 대한 구조해석 데이터와 추정된 유효물성치를 이용한 피로해석 및 잔여수명 평가 과정을 기술하였다.

제 7 장에서는 본 연구를 통해서 얻은 결론을 서술한다.

본 논문의 목적을 달성하기 위한 연구수행체계는 Fig. 1과 같다.

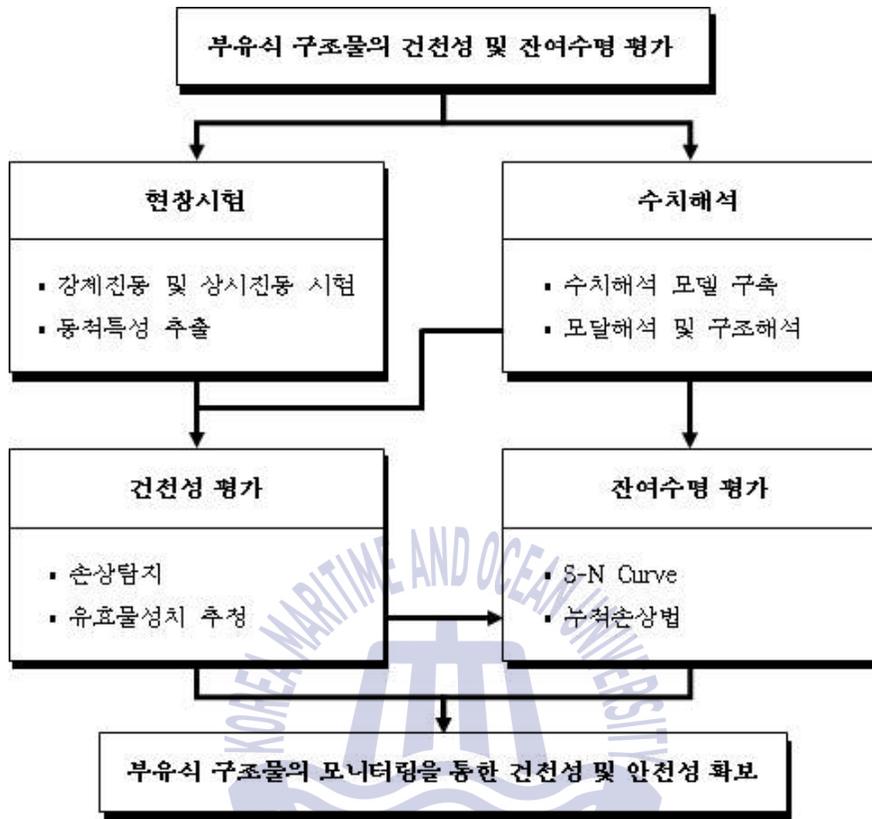


Fig. 1 Flowchart of study

제 2 장 부유식 구조 시스템

2.1 개요

부유식 구조물은 부력에 의해 자중에 저항하며 수면에 떠있는 구조물로 상부 구조, 하부부체 및 계류시설로 구성되며, 하부부체는 폰툰식, 반잠수식, 공기안정식, 연착저식 등의 구조형식으로 나눌 수 있다. 부유식 구조물에 적용되는 계류시설은 이완 계류, 돌핀 계류, 인장각식 계류, 안벽 계류 등의 방식이 주로 쓰이고 있으며, 하부부체의 종류 및 설치 해역의 조건에 따라 적절한 시스템을 적용하고 있다.

2.2 부유식 구조물 하부부체의 분류

2.2.1 폰툰식

폰툰식(Pontoon type) 구조물은 Fig. 2와 같이 갑판, 선저, 종격벽, 횡격벽 등의 요소부재로 이루어진 유니트 구조물을 해상에서 접합하여 만들어 내는 단순 상자형의 해양구조물이다. 이 형식은 유니트의 구조형태가 단순하여 표준화 할 수 있으며, 대량제작이 용이한 장점이 있으나, 유니트 제작 후 해상 접합을 하는데 있어서 기술적 난이성을 가진다는 단점이 있다.

사용재료는 크게 철근콘크리트, 강재, FRP계가 쓰이며, 철근콘크리트의 경우 내구성이 풍부하고 홀수가 깊기 때문에 동요가 적지만 충격에 의해 파손되기 쉽다. 강재의 경우 제작이 용이하고 충격에 강하고 보수가 용이하지만 해수에 의한 부식으로 내구성이 약하다. FRP는 경량으로 내구성이 풍부하며 설치가 간단하기 때문에 요트 하버 등 소규모 부잔교에 이용된다.

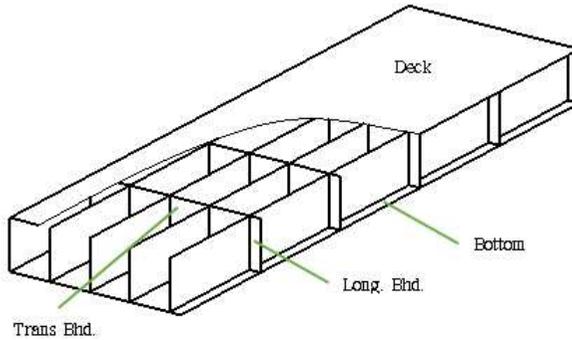


Fig. 2 Structural configuration of pontoon

2.2.2 반잠수식

일반적으로 반잠수식(Semi-submersible Type) 구조물은 Fig. 3과 같이 상부 구조물, 수직기둥, 수중 푸트로 구성된다. 폰툰과 마찬가지로 기존의 조선소 도크 혹은 가설도크에서 제작 가능한 다수의 유니트로 구성되며, 유니트 결합시 대기에서 용접이 가능하여 현지결합이 쉬운 특징이 있다. 그러나 연결 갑판부면에 외하중에 의한 처짐이 크게 나타나는 단점이 있다.

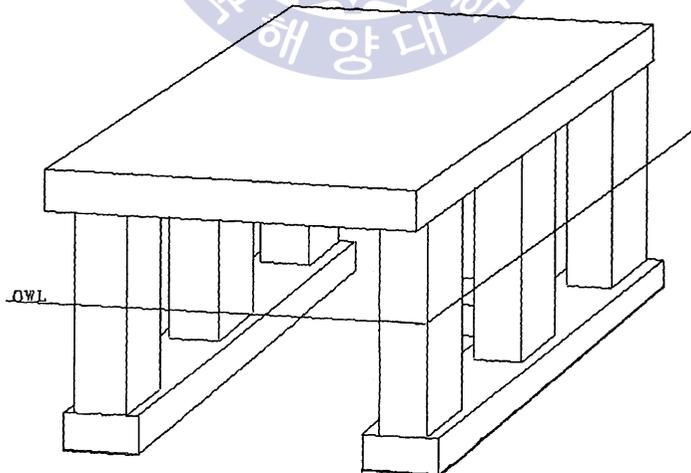


Fig. 3 Structural configuration of semi-submersible

폰툰식과 비교해 상대적으로 작은 수선면적을 가지므로 운동성능이 양호하고, 수면아래의 환경보전이 용이하다, 또한 상부 구조물을 떠받치는 기둥형 부체의 교체가 가능하고 추후 공간의 변경 및 손상대응이 쉽고 보수점검이 용이하다는 특성이 있으나 폰툰형식보다 건조하기 복잡하고 중량이 많이 들어 건조비가 더 드는 단점이 있다(안진희, 2010).

2.2.3 공기안정식

기존의 대부분의 부유식 구조물은 부유체가 해수와 직접 접촉하는 배수방식을 택하고 있으며, 이러한 방식은 안전성 유지를 위해 흘수를 깊게 하는 특징을 가진다. 흘수가 깊어지면 부유식 구조물의 진수 및 이동에 많은 제약과 어려움이 따른다. 따라서 흘수가 작은 대형 부유식 구조물에 대한 연구가 시작되었으며, 그 중의 일례가 부유체와 해수 사이에 공기를 가두어, 그 공기에 의해 지지되어 배수하는 간접 배수방식이다. 이러한 공기에 의해 간접배수를 하는 부유식 구조물을 공기안정식 플랫폼(Pneumatically Stabilized Platforms)이라 한다. 공기안정식 플랫폼에 대해서는 구상 사례만 존재하고 아직 건조사례는 없으며, Air Pocket Factor의 검증을 위한 시험이 수행된 정도이다(한국해양연구원, 1998).

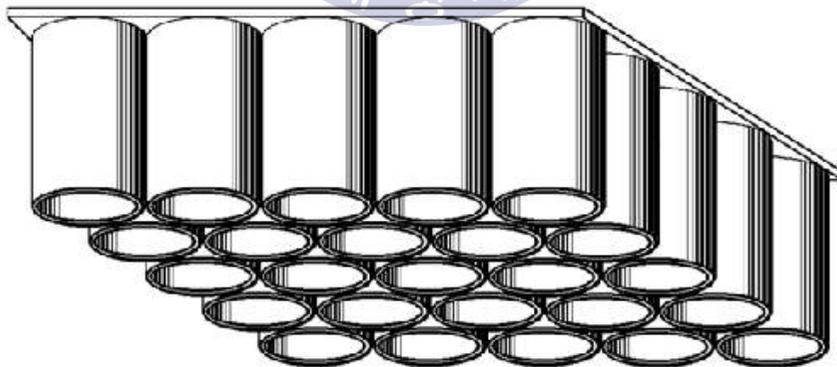


Fig. 4 Pneumatically stabilized platforms cell array

공기안정식 시스템의 모듈은 Fig. 4와 같이 실린더 형태로 이루어지며, 재료는 콘크리트가 사용된다. 콘크리트는 강재에 비해 해수에 내식성이 우수하고,

전자기장에 영향이 적은 성질을 가진다. 또한 실린더 형태의 모듈에는 90방향으로 4개의 구멍을 설치하여, 모듈간의 공기 이동을 가능하게 한다. 파도의 상승에 의한 수직하중은 공기의 압축과 각 모듈에 설치된 구멍을 통한 이동을 통해 완화되며, 수평하중은 주변에 파도감쇠장치를 설치하여 흡수한다(Hillyard, 2005).

2.2.4 연착저식

Terai(1985)에 의해 제안된 연착저식 구조물(Soft landing type structure)은 부유식과 착저식의 중간 형태로 부력에 의해 구조물의 중량을 상쇄시킨다. 상부 구조는 50m 간격의 기둥으로 지지되며, 하부구조는 Fig. 5와 같이 상부 기둥, 부력 탱크, 지층 파일로 구성된다. 구조물을 지지하는 기둥의 끝단은 벨러스트 탱크에 의해 기초하중을 최소화하며, 동시에 수평이동을 억제하기 위하여 해저면과의 결합을 조절한다. 연착저식 구조물은 100m 정도의 대수심에서도 경제적 타당성을 가진다(Craven, 1987).

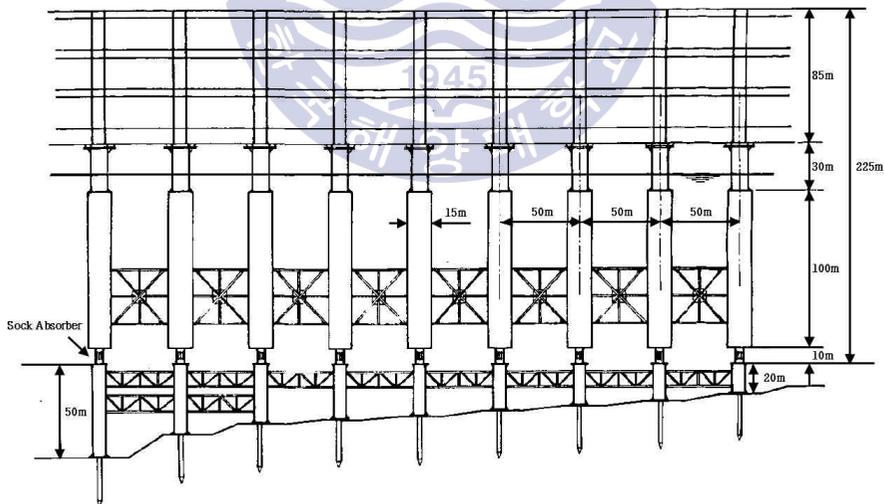


Fig. 5 Conceptual layout of a soft landing type structure

2.3 계류방식

2.3.1 이완 계류

이완계류(Catenary mooring)는 기본적으로 계류삭의 자중을 이용하여 부유체에 작용하는 수평하중을 상쇄시켜 위치를 유지하는 방법이다. 이 방식은 오랫동안 사용되어 그 기술이 검증되었고 여타 계류방식보다 저렴하다는 이점이 있으며, 설치도 비교적 간편한 장점이 있다.

위치유지를 위해 계류삭의 자중이 필요하므로 너무 얕은 수심에서는 충분한 계류력을 발휘할 수 없으며, 수심이 너무 깊은 경우에도 계류삭 자중에 의해 계류삭이 파단되어 사용할 수 없다. 이와 같은 경우 체인-와이어로프-체인, 와이어로프-합성로프 등을 사용하는 복합 계류삭을 사용하거나, 계류삭의 자중이 아닌 합성로프의 인장력으로 계류하는 Taut mooring방식을 사용한다. 또한 자중의 완화를 위해 중간에 부이를 달기도 한다.

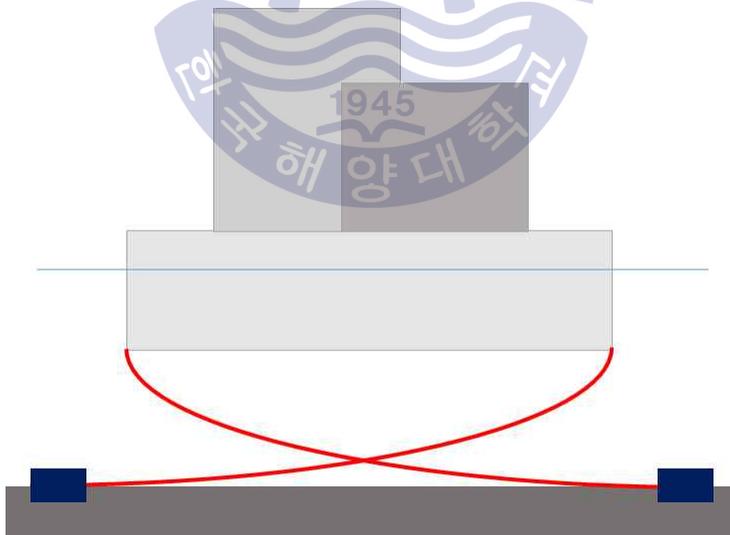


Fig. 6 Chain mooring

2.3.2 돌핀 계류

일반적으로 돌핀계류(Dolphin mooring) 방식은 수심이 얇고 정온화된 해역에 사용된다. 파랑하중에 의한 동요의 흡수는 1차적으로 구조물과 돌핀사이에 방충재 역할을 하는 펜더가 담당하게 되고 펜더 변형에 의해 발생하는 반력은 돌핀구조를 통하여 지반으로 전달 흡수된다.

돌핀계류 배치는 부유식 구조물의 수평동요를 최소화하기 위하여 적어도 2축 방향에 배치하여야 한다. 돌핀의 배치는 부체의 동요를 최소화 할 수 있도록 부체의 양쪽 측면에 돌핀을 배치하는 양현배치가 좋으나 경제성 및 시공성을 고려하여 한쪽 면에 돌핀을 배치하는 편현배치가 일반적으로 많이 사용된다(홍사영, 2007).

돌핀계류 방식은 표류변위가 매우 적고 이완 계류나 인장각식 계류에서 발생하는 장주기 대진폭 표류운동이 없다. 또한 계류를 위한 점유공간이 매우 적어 항내구조물에서도 적당하다. 그러나 돌핀을 설치하기 위한 토목공사가 필요하여 상대적으로 설치가 어렵고 비용이 많이 들며, 이동설치도 불가능한 단점이 있다(한국건설기술연구원, 2014).

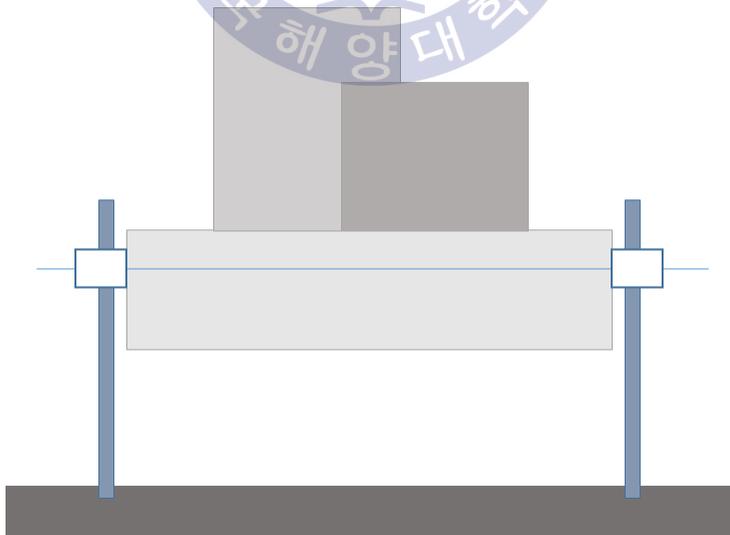


Fig. 7 Dolphin mooring

2.3.3 인장각식 계류

인장각식 계류 시스템(Tension leg mooring system)은 상부 구조물과 Hull, Tether, 앵커로 구성된다. 하부부체의 부력은 전체 부유식 구조물의 무게보다 크게 설계되며, 예비부력은 Tether에 장력을 작용시킨다. 인장각식 계류 시스템에 의해서 부유식 구조물은 수직, Roll과 Pitch에 의한 운동은 제어되지만 풍하중 및 파랑하중에 의한 수평이동은 허용된다. 해저에 위치한 앵커는 자중 및 부유체에 작용하는 바람, 파도, 해류에 의한 하중을 충분히 견딜 수 있도록 허용 인발력을 충분히 크게 설계하여야 한다(Sachithanathamoorthy, 2012).

인장각식 계류 시스템은 구조물 자체의 부력을 이용하기 때문에 Tether의 장력이 일정 수준 이상을 유지해야하기 때문에 구조물 상부에 설치할 수 있는 기자의 무게 즉 Deck load에 한계가 있다는 단점이 있으며, Tether의 장력이 충분하지 못할 경우 상하운동 억제 효과가 없어지고, Roll과 Pitch 또한 심해져서 불안정해지게 된다.



Fig. 8 Tension leg mooring system

2.3.4 안벽 계류

안벽 계류(Quay wall mooring system)는 선박이 부두에 접안하여 안전한 하역이 가능하도록 선박을 일정 위치에 유지시켜 외력의 한계를 증대시키는 계류 방식으로서 세 가지 구성요소로 이루어져 있다. 먼저 Bow와 Stern line은 전후 좌우 방향이동 및 부두에 접안 유지를 위한 것이며, Spring line은 선체의 전후 방향 이동 억제, Breast line은 횡압력을 억제하기 위한 것이다. 선박을 부두에 접안시킬 때 계류삭은 선박의 계류 환경에 따라 10개에서 32개 정도까지 사용되고 있으며, 부이에 계류시킬 때는 그 숫자가 감소한다(김준배, 2013).

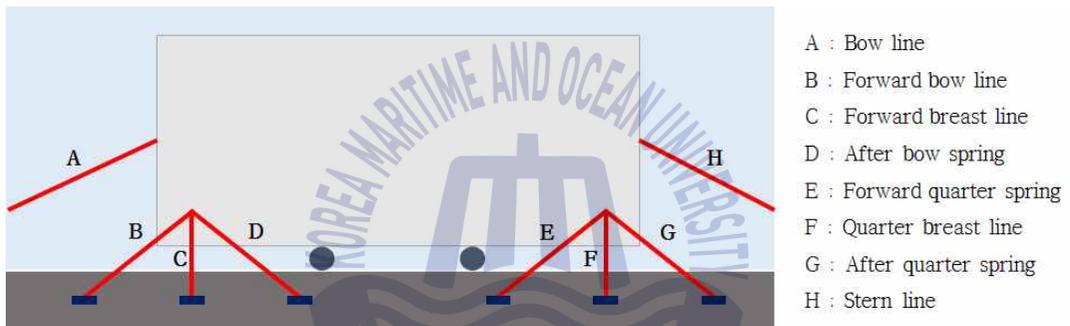


Fig. 9 Quay wall mooring system

2.4 부유식 구조물의 주요 하중

2.4.1 고정하중

고정하중은 사용기간 동안 영구적인 부유식 구조물의 대기 중 중량을 나타내며, 다음과 같은 것들이 있다. 외적 정수압은 일반적으로 부유식 구조물의 설계 흘수에 일치하는 정수압과 부유식 구조물의 설계에 의존적인 종적 요소를 결합하여 계산할 수 있다(박영희, 2008).

- 부유식 구조물 자체의 대기 중 중량
- 부유식 구조물이 설계흘수까지 잠겨있다고 가정할 때, 정수상태에서의 외적인 정수압과 부력

- 영구적인 벨리스트와 사용상 필요한 액체를 포함한 영구적인 장치의 중량
- 접속교량, 승객실, 사무실, 저장시설 및 영구적 목적의 장비 등

2.4.2 활하중

구조물 상판에 재하 되는 활하중은 부유식 구조물의 정상적인 사용 환경하에서 가변적이고 적절한 운용관리를 통해 통제가 가능한 하중들을 나타내며, 적재하중, 하역기기하중 및 기타하중 등이 있다.

(1) 적재하중

상시의 적재하중은 취급화물의 종류, 화물의 형태, 수량, 취급방법, 적재기간 등을 충분히 고려하여 결정한다.

(2) 하역기기하중

하역기기하중에는 이동식 하역기기하중, 궤도주행식 하역기기하중과 고정식 하역기기하중이 있다. 이동식 하역기기하중은 사용이 예상되는 이동식하역기계의 전체중량, 최대운하중, 아웃트리거 최대하중 또는 크롤러의 최대 접지압으로 하며, 궤도주행식 하역기기하중은 전체 중량 또는 차륜 간격과 바퀴수를 고려한 최대운하중으로 하여야 한다. 고정식 하역기기하중은 최대하중으로 한다.

(3) 기타하중

기타 활하중에는 철거 가능한 생산 장비의 무게, 승선인원과 소비 재료의 무게 등이 있으며, 이들의 실제의 중량을 적용한다.

2.4.3 파랑하중

우리나라 해안에 내습하는 설계파랑은 주로 태풍과 동계 계절풍에 의한 파랑이다. 현재까지 우리나라에 있어서 파랑의 실측기간은 길지 않으나, 바람자료는 관측기간이 상대적으로 길기 때문에 바람자료로부터 추산한다(해양수산부,

2014).

최근에는 태풍 또는 저기압에 의한 바람은 기압 분포에서 비교적 정확하게 계산할 수 있고, 그 결과를 가지고 파랑수치모형을 사용하여 계산된 불규칙파의 파고와 주기를 사용한다. 파랑의 통계처리는 이상(異常) 파랑과 평상시(平常時) 파랑으로 구분하여 이에 적합한 분석방법을 사용한다. 이상시 파랑은 태풍, 폭풍 등에 의해 발생하는 고파랑의 장기간 자료의 극치통계분석을 통해 구하며, 평상시 파랑은 1년 이상의 연속된 파랑자료를 통계 처리하여 구한 파랑조건을 사용한다. 이상 파랑은 구조물의 설계파 산정과 이상시 항내정온도 검토에 이용되고, 평상시 파랑은 항내정온도 분석 및 항만가동일수 또는 작업일수를 산정하는 데 이용된다.

(1) 규칙파

파랑의 선형적인 특성은 미소진폭파 이론으로 나타내어지며, 필요에 따라 고차의 근사식인 유한진폭파 이론에 의해 보다 정밀한 파랑 특성을 계산할 수 있다. 미소진폭파 이론에 따른 파랑운동은 속도포텐셜 ϕ 로 표시된다. 파랑의 운동방정식은 라플라스(Laplace)식($\nabla^2\phi=0$)이며, 적합한 경계조건을 부여하고 $H \ll L$ 및 $H \ll h$ 의 전제조건하에 풀면 다음과 같은 파랑 특성을 얻게 된다.

(가) 수면변위

$$\eta_{(x,t)} = \frac{H}{2} \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (1)$$

여기서, η 는 기준면인 정수면으로부터의 수면변위로서 파의 형태를 나타내고, x 축은 파의 진행 방향으로 취한 거리, z 축은 정수면에서 연직상향으로 취한 거리, t 는 시간, T 는 주기(s), L 은 파장(m), 그리고 H 는 파고(m)이다.

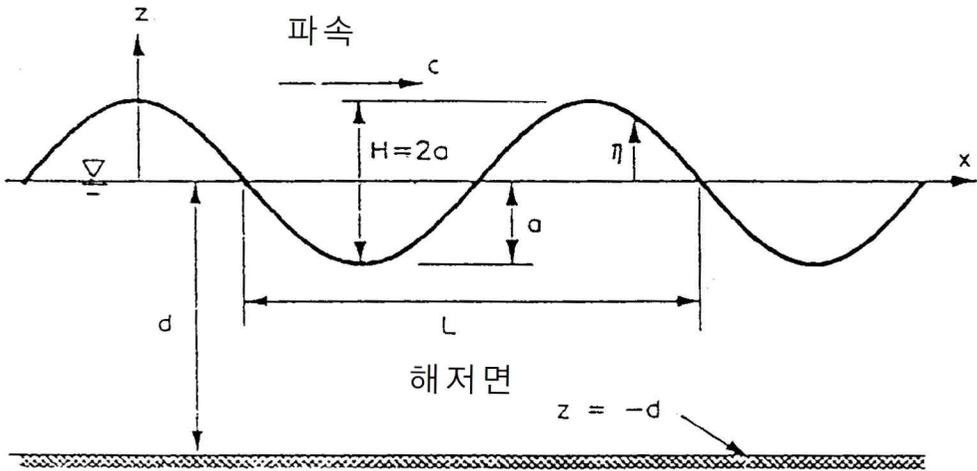


Fig. 10 Definition of regular wave

(나) 파장

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (= CT) \quad (2)$$

여기서, g 는 중력가속도(m/s^2), h 는 수심(m)이다. 식 (2)를 파랑분산식이라 하며, 각주파수 $\sigma (= 2\pi/T)$ 와 파수 $k (= gk \tanh kh)$ 를 사용하면 식 (3)이 된다.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (3)$$

식 (2) 또는 식 (3)은 파장 또는 파수에 대한 비선형식 이므로 반복법으로 계산한다.

(다) 파속

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad \left(= \frac{L}{T} \right) \quad (4)$$

(라) 파력

$$p = w_0 \frac{H}{2} \frac{\cosh \frac{2\pi(z+h)}{L}}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) - w_0 z \quad (5)$$

여기서, w_0 는 해수(海水)의 단위체적중량이며, 식 (5)의 우변 첫 항은 동수압(動水壓), 둘째 항은 정수압(靜水壓)이다. 동수압은 파랑에 의한 수립자의 운동에 의한 압력 변동부분을 의미한다.

(마) 해면의 단위면적당 파의 평균에너지

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{8} w_0 H^2 \quad (6)$$

여기서, $E_k = E_p$ 이며 [$E_k =$ 운동에너지, $E_p =$ 위치에너지], 한 파장내의 모든 점에서의 평균에너지 E 는 일정하다. 단 마찰에 의한 손실은 무시한다.

(바) 단위시간에 단위폭당 파의 진행방향으로 전달되는 평균에너지

$$E_F = EC_G = ECn$$

여기서, C_G 는 파의 군속도(群速度)(m/s)이며, $C_G = Cn$ 이다.

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh \frac{4\pi h}{L}} \right) \quad (7)$$

위의 식들은 미소진폭파의 식이며, 실제 파랑은 이 식들과 다소 다르다. 그러나 파랑의 굴절, 수중압력 등을 취급할 때는 이들의 식을 이용할 때가 많으며, 특히 중복파는 미소진폭파를 합성함으로써 얻을 수 있다.

(2) 심해파 및 장파의 특성

(가) 심해파

$h/L > 1/2$ 인 해역에서는 수심이 깊어 파랑의 수립자 운동이 해저면까지

이르지 못해 수립자의 운동이 해저면에 의해 변형되지 않게 된다.

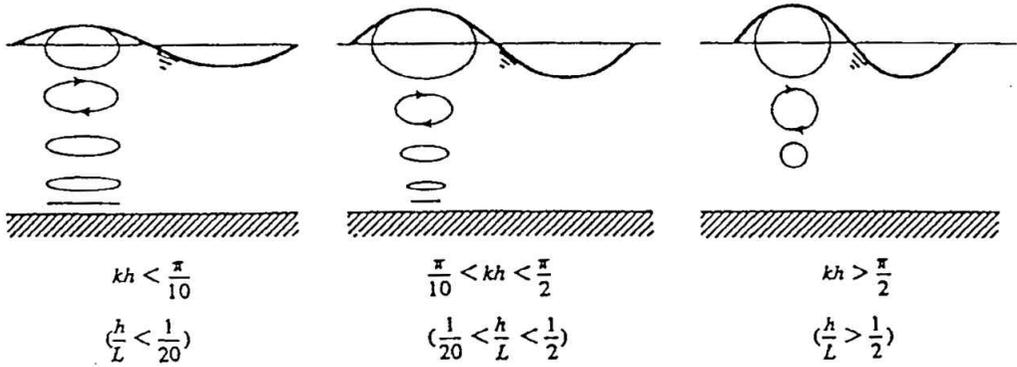


Fig. 11 Motion of water molecules according to relative depth

이 해역에 존재하는 파랑을 심해파라 하며, 파장에 비해서 수심이 아주 깊은 경우 $h/L \rightarrow \infty$ 라고 가정하여 파속 및 파장을 다음과 같이 구한다. 즉, $\tanh 2\pi h/L = 1$ 이므로 다음과 같다.

$$\begin{cases} L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56T^2 \text{ (m)} \\ C_0 = \frac{gT}{2\pi} = 1.56T \text{ (m/s)} \end{cases} \quad (8)$$

$$C_G = 0.78T \text{ (m/s)} = 2.81T \text{ (km/hr)}$$

아래첨자 o 는 심해파를 나타내는 것이며, 파속 및 파장은 모두 수심에는 관계없이 주기에만 관계된다.

(나) 파장 또는 천해파

$h/L < 1/20$ 인 수역에서는 파장이 수심에 비해서 매우 길며, 여기서의 파를 장파 또는 천해파라 한다. 천해파의 특성은 h/L 값이 매우 작아 $\tanh 2\pi h/L = 2\pi h/L$ 이므로 식 (9)와 같다.

$$\begin{cases} L = T\sqrt{gh} \text{ (m)} \\ C = C_G = \sqrt{gh} \text{ (m/s)} \end{cases} \quad (9)$$

$1/20 < h/L < 1/2$ 의 경우에는 천해역으로 파장과 파속이 복잡하게 변하며,

식 (2)와 식 (4)를 사용하여 구한다.

수심 h 와 파장 L , 파속 C , 주기 T 의 관계는 Table 2에 제시하였다.

Table 2 Relationship of depth, frequency, wavelength and allium

$h(m)$ \ $T(s)$	3.0		4.0		5.0		6.0	
	$L(m)$	$C(m/s)$	$L(m)$	$C(m/s)$	$L(m)$	$C(m/s)$	$L(m)$	$C(m/s)$
1.0	83.69	2.90	12.00	3.00	15.24	3.05	18.44	3.07
2.0	11.31	3.77	16.23	4.03	20.95	4.19	25.58	4.26
3.0	12.68	4.23	18.96	4.74	24.93	4.99	30.72	5.12
4.0	13.41	4.47	20.86	5.22	27.95	5.59	34.77	5.80
5.0	13.76	4.59	22.20	5.55	30.31	6.06	38.09	6.35
6.0	13.93	4.64	23.13	5.78	32.19	6.44	40.87	6.81
$h(m)$ \ $T(s)$	7.0		8.0		9.0		10.0	
	$L(m)$	$C(m/s)$	$L(m)$	$C(m/s)$	$L(m)$	$C(m/s)$	$L(m)$	$C(m/s)$
1.0	21.62	3.09	24.79	3.10	27.96	3.11	31.11	3.11
2.0	30.16	4.31	34.69	4.34	39.20	4.36	43.70	4.37
3.0	36.41	5.20	42.03	5.25	47.61	5.29	53.16	5.32
4.0	41.44	5.92	48.01	6.00	54.51	6.06	60.96	6.10
5.0	45.66	6.52	53.08	6.64	60.41	6.71	67.68	6.77
6.0	49.27	7.04	57.50	7.19	65.61	7.29	73.62	7.36
$h(m)$ \ $T(s)$	15.0		16.0		18.0		20.0	
	$L(m)$	$C(m/s)$	$L(m)$	$C(m/s)$	$L(m)$	$C(m/s)$	$L(m)$	$C(m/s)$
1.0	46.84	3.12	49.98	3.12	56.26	3.13	62.54	3.13
2.0	66.05	4.40	70.50	4.41	79.40	4.41	88.29	4.41
3.0	80.65	5.38	86.12	5.38	97.04	5.39	107.95	5.40
4.0	92.84	6.19	99.18	6.20	111.82	6.21	124.44	6.22
5.0	103.49	6.90	110.59	6.91	124.76	6.93	138.90	6.94
6.0	113.02	7.53	120.82	7.55	136.38	7.58	151.90	7.59

제 3 장 이론적 배경

3.1 개요

구조 건전성 모니터링 기법은 정적응답 또는 동적응답을 이용한 기법으로 구분할 수 있으며, 구조물의 상시 감시가 가능하다는 측면에서 동적응답에 의한 기법들이 선호되고 있다. 동적응답 변화에 기반을 둔 구조 건전성 모니터링 기법은 가속도 및 속도, 기울기, 변위 등 다양한 계측 데이터를 이용하며, 많은 연구자들에 의하여 다양한 기법들이 개발되었다.

일반적으로 구조물에 손상이 발생하면 동적특성(모드형상, 고유진동수)도 변화한다. 이러한 특성에 기초하여 구조물에 다수의 센서를 설치하고 계측한 데이터를 분석하여 손상을 검출할 수 있다. 모드형상을 이용한 비파괴 손상평가(Nondestructive damage evaluation, NDE) 기법은 초기 건전한 상태의 구조물의 모드형상과 계측 당시의 모드형상 변화를 통해 구조물에 발생한 손상 정도 및 위치를 파악할 수 있는 기법이다.

구조계 추정(System identification, SI)은 대상 구조물에서 계측한 데이터를 이용하여 실제 구조물을 대표하는 수학적 모델을 구축하는 것으로 구조물의 상태를 파악하고 거동 및 응답의 예측, 손상의 검출에 이용된다. 또한 계측한 응답을 통하여 구조물의 강성을 파악하는데도 적용할 수 있다(오변관 등, 2014). 주기적으로 계측한 데이터를 이용하여 구조계 추정을 수행하면 대상 구조물의 강성 변화를 감시할 수 있으며, 변화 경향을 예측할 수 있다.

구조물에 과대 하중이 작용할 때 부재는 탄성 변형 구간을 지나 소성 변형을 일으키게 되며, 결국에는 파단에 이르게 된다. 탄성 변형 구간 내에서도 하중을 반복적으로 작용할 경우 부재가 파괴되는 현상이 발생하며, 이러한 현상을 피로파괴라 한다. 응력집중 및 반복적인 응력에 의해 피로균열이 발생하며, 하중

의 반복 작용에 의해 피로균열이 진전하여 결국 파단에 이르게 된다. 피로파괴가 발생하면 연성재료인 경우에도 점진적인 균열이 발생한 후, 취성재료와 같이 급격한 파괴가 발생한다(박순목, 2012). 따라서 피로해석(Fatigue analysis)을 통해 구조물의 취약부와 잔존수명을 판단하고 유지관리 시기 및 방안을 결정할 필요가 있다.

3.2 플레이트 손상탐지 이론

본 연구에서는 부유식 구조물의 상부 슬래브의 손상 검출하기 위하여 Choi and Stubbs(1997)가 개발한 손상 지수법(Damage index method)을 적용하였다. 손상 지수법은 구조물의 질량, 감쇠 및 강성의 변화와 모달 응답 변화 사이의 민감도 관계를 기반으로 손상의 위치와 정도를 평가할 수 있는 기법으로 빔, 프레임, 트러스, 원통형 셸 등에도 적용될 수 있는 손상탐지 기법으로 플레이트 구조의 손상지표는 다음과 같이 유도된다.

플레이트 구조 시스템의 i 번째 모드에서의 모달 변형에너지는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_i = \frac{1}{2} \iint K \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dA \quad (10)$$

$$K = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

여기서 K 는 휨강성, A 는 바닥 면적, w 는 플레이트의 연직방향 변위, ν 는 포아송비이며, E 는 탄성계수, t 는 바닥의 두께를 의미한다.

위의 식을 j 번째 부재에 관하여 다시 쓰면, 식 (11)과 같으며, 여기서 γ_{ij} 는 식 (12)와 같다.

$$U_{ij} = \frac{1}{2} \iint k_j \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dA_j = k_j \gamma_{ij} \quad (11)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2} \iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dA_j \quad (12)$$

손상 후의 모달 변형에너지는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있으며, i 번째 모드에서의 j 번째 부재의 모달 변형에너지의 비를 F_{ij} 라 하면 식 (14)와 같다.

$$U_{ij}^* = k_j^* \gamma_{ij}^* \quad (13)$$

$$F_{ij} = U_{ij} / U_i \quad (14)$$

모달 변형에너지 비의 변화를 나타내면 식 (15)와 같이 표현할 수 있으며, 여기서 강성의 변화인 α_j 는 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dF_j \approx -F_j \alpha_j \quad (15)$$

$$\alpha_j = \frac{dk_j}{k_j} = \frac{k_j^* - k_j}{k_j} \quad (16)$$

j 번째 부재의 손상지수 $\beta_{ij} = k_j/k_j^*$ 로 표현할 수 있으며, 앞의 식들을 토대로 손상지수는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_{ij} = \frac{k_j}{k_j^*} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma_{ij}^* / \sum_{j=1}^{NE} \gamma_{ij}^*}{\gamma_{ij} / \sum_{j=1}^{NE} \gamma_{ij}} + 1 \right] \quad (17)$$

손상탐지를 위해 식(17)의 손상지수를 적용할 때 만일 분모의 항이 0에 가깝다면 실험데이터에 포함되어있는 노이즈나 2차 미분을 할 때 발생할 수 있는 수치적 에러의 영향을 받아 오류를 범하기 쉽다. 이러한 현상은 부재의 사이즈가 매우 작거나 또는 변위가 적은 곳에서 발생할 수 있다. 이러한 문제는 분자와 분모 항에 단순히 1을 더하여 식 (18)과 같이 손상지수의 영역을 이동시켜 해결할 수 있다.

$$\beta_{ij} = \frac{k_j}{k_j^*} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma_{ij}^* / \sum_{j=1}^{NE} \gamma_{ij}^* + 1}{\gamma_{ij} / \sum_{j=1}^{NE} \gamma_{ij} + 1} + 1 \right] \quad (18)$$

만약 NM개의 모드형상이 있다면 손상지수의 합은 식 (19)와 같이 표현된다.

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{i=1}^{NM} \left(\gamma_{ij}^* / \sum_{j=1}^{NE} \gamma_{ij}^* \right) + 1}{\sum_{i=1}^{NM} \left(\gamma_{ij} / \sum_{j=1}^{NE} \gamma_{ij} \right) + 1} + 1 \right] \quad (19)$$

3.3 손상 위치 추정 기법

손상지수를 계산한 후 손상위치를 결정하는 기준은 다양한 기법을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 여러 가지 방법들 가운데 패턴인식을 이용한 손상탐지 알고리즘을 사용하였다(박수용, 2004).

패턴인식의 경우 부재별 손상지수를 두 개의 그룹으로 분류할 수 있는데 손상이 없는 부재와 손상이 있는 부재로 분류할 수 있다. 부재 손상의 그룹 분류를 위해 비교적 이용이 쉬운 Neyman-Pearson 기준(Gibson et al., 1976)을 사용하였으며 다음과 같은 두 가지 경우의 가설을 설정할 수 있다.

- 가설 H_0 : 구조물 내 j 번째 부재에 손상이 없음
- 가설 H_1 : 구조물 내 j 번째 부재에 손상이 있음

손상지수를 계산한 후 손상위치를 결정하는 기준은 통계적 이론으로 구할 수 있으며 각 부재로부터 구한 손상지수 값을 확률변수로 고려하여 표준화된 손상지수로 식 (20)과 같이 표현된다.

$$Z_j = \frac{\beta_j - \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (20)$$

여기서 μ_β 와 σ_β 는 각각 손상지수 β_j 의 평균과 표준편차를 나타내며 만일 손

상지수의 분포가 정규분포라고 가정하면 표준화된 손상지수의 확률 밀도 함수 (Probability density function)는 Fig. 12와 같다.

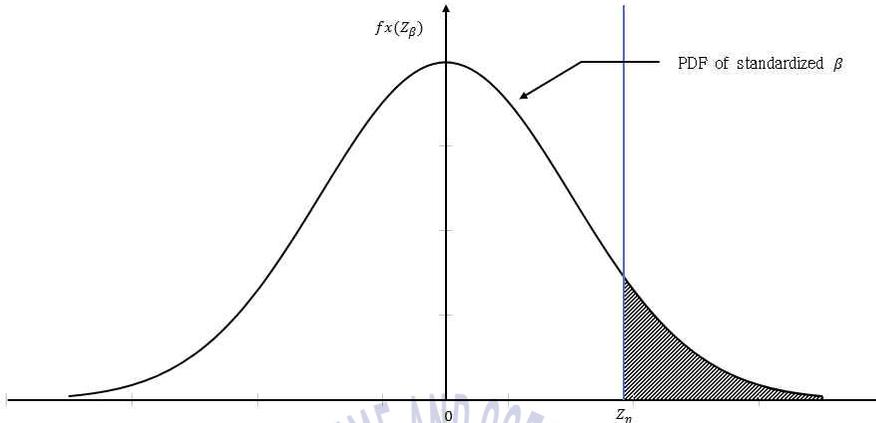


fig. 12 Probability density function

j 부재의 손상유무는 단측검증(One-tailed test)으로부터 다음과 같이 결정할 수 있다.

- $Z_j > Z_\eta$ 일 경우, j 부재에 손상이 있음
- $Z_j < Z_\eta$ 일 경우, j 부재에 손상이 없음

여기서 Z_η 는 가설테스트의 신뢰도(Significance level)를 확률적으로 반영하는 지수로서 Z_η 의 값에 따라 가설테스트의 신뢰도는 다음과 같다.

- $Z_\eta = 1$ 일 경우, 84% 신뢰도를 가짐
- $Z_\eta = 2$ 일 경우, 98% 신뢰도를 가짐
- $Z_\eta = 3$ 일 경우, 99% 신뢰도를 가짐

손상탐지 기법의 절차를 도식화 하면 Fig. 13과 같다.

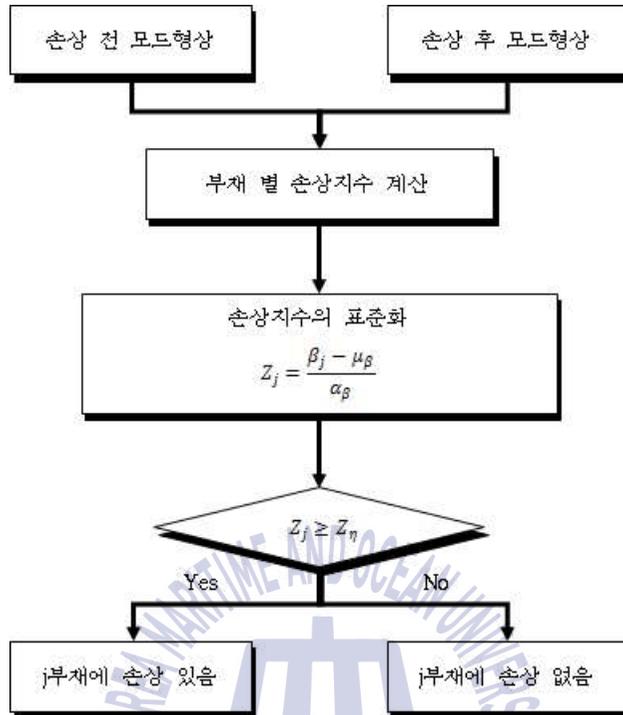


Fig. 13 Flowchart of damage detection

3.4 구조계 추정기법

구조계 추정기법의 정의는 측정한 시점에서의 구조계의 강성, 질량 등을 가장 잘 대표하는 수학적 모델을 만드는 과정으로, 구조계 추정기법은 초기에는 구조 시스템의 강성의 변화에 의한 고유진동수 변화를 이용하여 손상위치 탐사 및 손상도 추정을 위하여 개발되었다. Stubbs and Osequeda(1990)이 개발한 민감도행렬 기반 구조계 추정기법은 고유치와 부재 강성의 상관관계를 이용한 기법으로 적용성이 뛰어나며 계산량이 상대적으로 적은 장점이 있다.

어떤 구조시스템이 질량 $m_k(k=1, \dots, Q)$ 과 구조부재, 즉 강성 $k_j(j=1, \dots, P)$ 로 구성되어 있다고 하면 그 구조시스템의 고유치(Eigenvalues) $\lambda_i(i=1, \dots, N)$ 는 식 (21)과 같이 나타낼 수 있으며, i 번째 고유치의 미세편차 $\delta\lambda_i$ 는 강성과 질량의 미세편차의 합으로 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다.(박수용, 2003)

$$\lambda_i = \lambda_i(k_1, \dots, k_R; m_1, \dots, m_Q) \quad (21)$$

$$\delta\lambda_i = \sum_{j=1}^P \frac{\partial\lambda_i}{\partial k_j} \delta k_j + \sum_{k=1}^Q \frac{\partial\lambda_i}{\partial m_k} \delta m_k \quad (22)$$

여기서, δk_j 와 δm_k 는 각각 부재 강성의 미세편차와 부재 질량의 미세편차를 나타낸다.

식 (22)의 양쪽 항을 λ_i 로 나누고 $Z_i = \delta\lambda_i / \lambda_i$ 로 정의하면 식 (23)과 같다.

$$Z_i = \frac{\delta\lambda_i}{\lambda_i} = \sum_{j=1}^P \frac{k_j}{\lambda_i} \frac{\partial\lambda_i}{\partial k_j} \frac{\delta k_j}{k_j} + \sum_{k=1}^Q \frac{m_k}{\lambda_i} \frac{\partial\lambda_i}{\partial m_k} \frac{\delta m_k}{m_k} \quad (23)$$

K_i 와 M_i 를 각각 i 번째 모달 강성과 j 번째 모달 질량으로 정의하고 $\lambda_i = K_i / M_i$ 를 식 (23)에 대입하여 정리하면 식 (24)와 같다.

$$Z_i = \frac{\delta\lambda_i}{\lambda_i} = \sum_{j=1}^R F_{ij} \alpha_j - \sum_{k=1}^Q G_{ik} \beta_k \quad (24)$$

여기서, $F_{ij} = \frac{k_j}{K_i} \frac{\partial K_i}{\partial k_j}$, $G_{ik} = \frac{m_k}{M_i} \frac{\partial M_i}{\partial m_k}$, $\alpha_j = \frac{\delta k_j}{k_j}$, $\beta_k = \frac{\delta m_k}{m_k}$ 이다.

만일 시스템의 질량은 변하지 않는다고 가정하면 식 (24)는 식 (25)와 같이 쓸 수 있다.

$$Z_i = \sum_{j=1}^R F_{ij} \alpha_j \quad (25)$$

벡터 Z_i 는 두 시스템(실제구조물과 유한요소모델)간의 고유진동수 제공의 분수적 차이를 나타내는 변수로 식 (26) 또는 식 (27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_i = \{z_1 \cdots z_i\}^T \quad (26)$$

$$z_n = \frac{\omega_n^{-2} - \omega_n^2}{\omega_n^2} \quad (27)$$

여기서, ω_n 은 계측 고유진동수이고 $\bar{\omega}_n$ 은 유한요소 모델의 고유진동수이며, $F_{ij} = \frac{k_j}{K_i} \frac{\partial K_i}{\partial k_j}$ 행렬은 강성의 변화와 고유치 변화의 상관관계를 나타내는 강성 민감도 행렬로 행렬의 크기는 $n \times R$ 이다. $\alpha_j = \frac{\delta k_j}{k_j}$ 행렬은 두 시스템간의 강성의 차이를 나타내는 $R \times 1$, 행렬이다.

식 (25)를 다시 정리하면 식 (28)과 같다.

$$Z = F\alpha \quad (28)$$

따라서 두 시스템간의 강성의 차이 α 는 식 (29)와 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = F^{-1}Z \quad (29)$$

여기서, F^{-1} 은 F 의 역행렬이다.

식(29)를 이용하여 두 시스템간의 강성의 차이를 구하기 전에 부재 강성과 고유치 변화에 대한 민감도 행렬 F 를 먼저 구하여야 한다. 민감도 행렬 F 는 다음과 같은 절차에 따라 수치해석적으로 구할 수 있다.

- (1) 초기 물성치를 가정한 수치해석 모델을 만든 후 고유치 해석을 통하여 수치해석 모델의 고유치 $\lambda_i (i=1, \dots, n)$ 를 계산한다.
- (2) 하나의 부재강성을 $\alpha_j = \alpha$ 로 일정한 수치만큼 줄인다. 이 때 다른 부재의 강성의 변화는 $\alpha_k (k \neq j) = 0$ 이다.
- (3) 하나의 부재 강성이 변한 수치해석 모델의 고유치 해석을 통하여 수치해석 모델의 고유치 $\lambda_i^* (i=1, \dots, n)$ 를 계산한다.
- (4) 두 시스템간의 고유치 변화행렬 $Z_i = \delta\lambda_i / \lambda_i$ 을 계산한다.

여기서, $\delta\lambda_i = \lambda_i^* - \lambda_i$

- (5) 민감도 행렬 F 의 ij 번째 요소를 다음과 같이 계산한다. $F_{ij} = Z_i / \alpha_j$

(6) (1)에서 (5)의 절차를 $k=1, \dots, R$ 개의 구조부재에 대하여 반복하여 F 행렬을 완성한다.

민감도 행렬을 구한 후 대상 구조물의 구조계를 추정하는 절차는 다음과 같다.

- (1) 대상 구조물에서 주파수 응답함수를 구한 후 고유진동수(n 개)를 추출한다.
- (2) 초기 물성치를 가정한 수치해석 모델을 만든다.
- (3) 수치해석 모델을 이용하여 위의 절차와 같이 민감도 행렬 F 를 계산한다.
- (4) 수치해석 모델에서 고유진동수(n 개)를 계산한다.
- (5) 계측한 고유진동수와 초기 수치해석 모델에서 계산한 고유진동수를 이용하여 두 시스템의 고유치 변화를 포함하는 Z 행렬 $\{z_1 \dots z_n\}^T$ 을 계산한다.
- (6) 식 (29)를 이용하여 두 시스템간의 강성의 차이 α 행렬을 구한 후 수치해석 모델의 강성을 식 (30)으로 계산하여 수정한다.

$$k_j^* = k_j(1 + \alpha_j) \quad (30)$$

- (7) 두 시스템이 완전히 일치할 때까지 위의 절차를 반복한다. 즉, $Z \approx 0$ 혹은 $\alpha \approx 0$ 으로 수렴할 때까지 반복한다.

구조계 추정 과정을 도식화하면 Fig. 14와 같이 나타낼 수 있으며, 이러한 절차를 통해 업데이트된 수치해석의 모델은 실제 구조물과 가장 가까운 수학적 모델이 되고 수치해석모델의 물성치를 대상 구조물의 유효물성치로 간주할 수 있다.

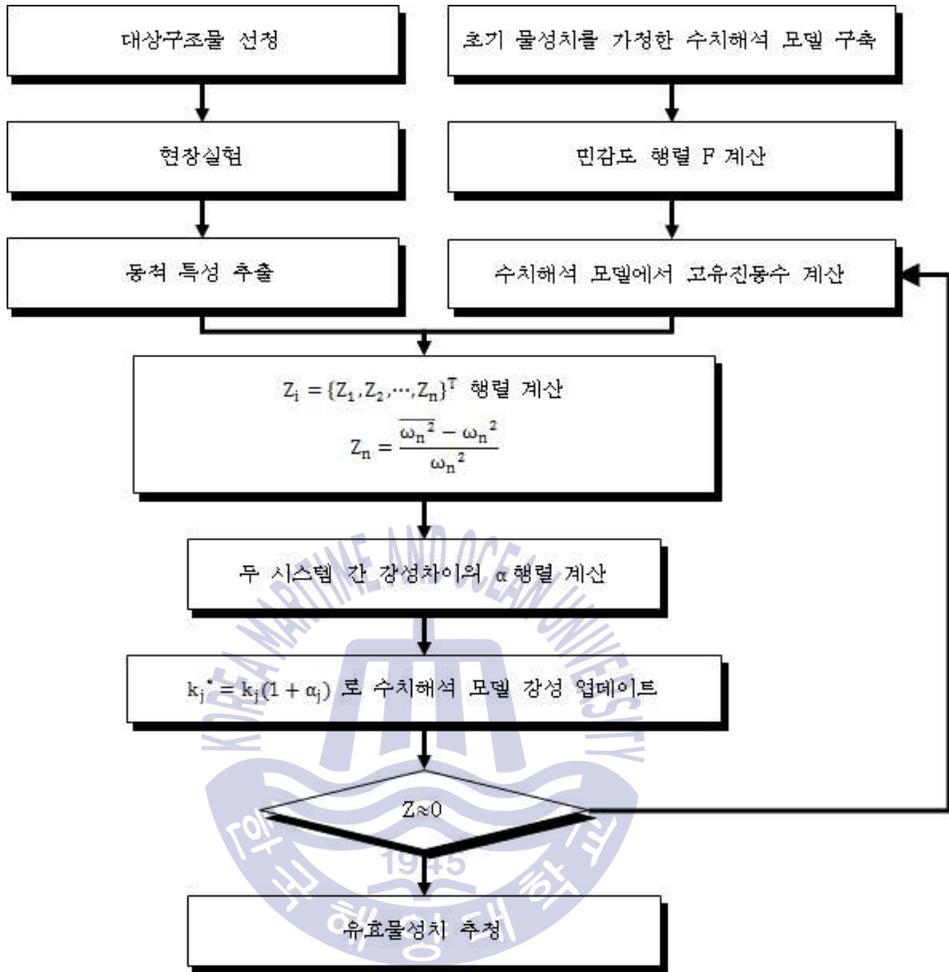


Fig. 14 Flowchart of system identification

3.5 피로해석 이론 및 기준

피로하중에 의해 재료가 파괴되기까지의 전체 피로수명(Total fatigue life)은 균열 발생수명(Crack initiation life)과 균열 진전수명(Crack propagation life)으로 구분되어 진다. 균열 발생수명은 균열의 생성과 초기성장을 의미하고 균열 전파수명은 전체 수명 중 발생한 균열이 파괴에 이를 때까지 성장하는데 소요되는 수명을 말한다(이두한, 2000).

피로파괴는 작용되는 하중형태와 전체 수명에 따라 저주기피로와 고주기피로로 구분할 수 있다. 저주기피로는 소성변형을 일으킬 만큼 큰 하중이 작용하여 $10 \sim 10^5$ cycle의 비교적 짧은 수명일 때를 나타내며, 고주기피로는 대부분의 하중이 탄성범위 내로 낮게 작용하여 10^5 cycle 이상의 비교적 긴 수명일 때를 일컫는다.

피로해석의 방법에는 크게 3가지로 나눌 수 있으며, 응력-수명(Stress-life)방법, 변형률-수명(Strain-life)방법과 파괴역학적(Fracture mechanics) 방법이 있다. 이 세 가지 방법은 적용을 위한 고유의 영역이 있으나 이들 영역의 구분이 어려운 부분도 있으므로 세 가지 방법을 모두 이해하여야 주어진 문제에 가장 적합한 방법을 선택할 수 있다.

응력-수명 방법은 응력과 변형률이 탄성범위 내에서 작용하여 장수명을 가질 때 적용되며 균열발생과 전파수명을 구분하지 않고 부재가 파단 될 때까지의 전체 수명을 다룬다. 변형률-수명 방법은 균열 발생 접근법이라고 여겨지고 있으며 작용하는 변형률이 탄성범위를 넘어서 소성영역이 발생될 경우에 적용된다. 파괴역학적 방법은 선형탄성파괴역학의 원리를 기초로 한 방법이며, 발생된 초기 균열의 전파수명을 예측하기 위해 사용된다. 이 방법은 전체 수명을 예측하기 위해 변형률-수명 방법과 함께 사용된다.

본 논문에서는 파랑하중에 의한 부유식 구조물의 장수명에 대한 해석을 수행함으로 응력-수명 방법을 사용하여 피로해석을 수행하였다.

응력-수명 곡선(S-N curve)은 구조물에 일정 진폭(Constant amplitude)의 반복하중(Repeated load)이 작용할 때, 발생하는 응력진폭(Stress amplitude, S)과 해당 진폭응력이 반복될 때 파괴에 이르게 하는 반복 회수(Cycle to failure, N)의 관계를 나타낸 곡선으로 Fig. 15와 같다.

파괴되기까지의 응력의 반복 횟수는 가해지는 응력의 진폭에 상당히 영향을 받는다. 이 관계를 보기 위해 응력진폭을 세로축에, 그 응력진폭을 가했을 때 재료가 파괴되기까지의 반복 횟수의 로그를 가로축에 잡아 곡선을 그려보면, 일반적으로 재료의 S-N curve는 응력진폭이 작을수록 파괴까지의 반복 횟수는

증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 응력진폭이 어느 값 이하가 되면 무한히 반복하더라도 파괴되지 않는다. 이 S-N curve가 수평이 되는 한계의 응력을 재료의 피로한도 또는 내구한도라고 한다.

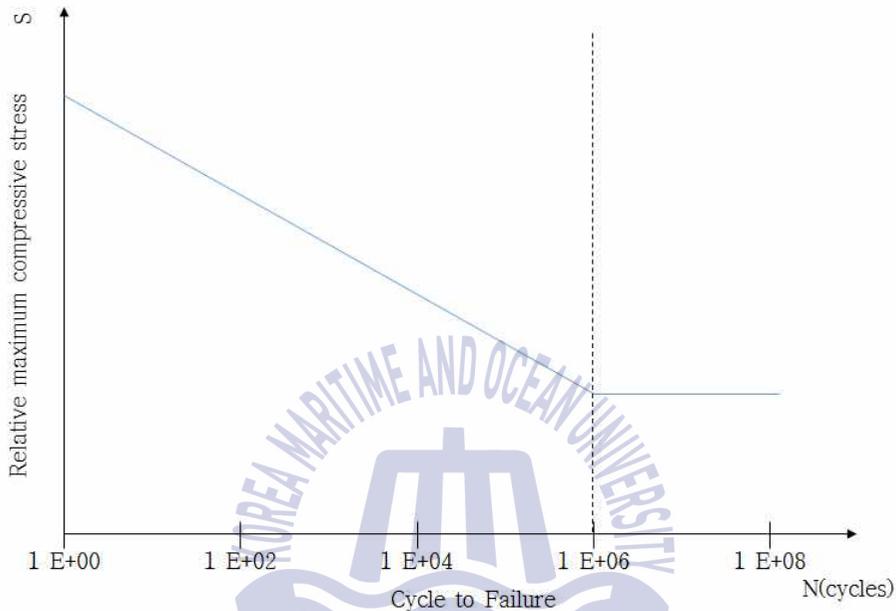


Fig. 15 S-N curve

본 논문에서는 노르웨이 선급협회에서 제안한 해양 콘크리트 구조물 설계기준의 피로해석 코드(DNV, 2012)를 이용하여 피로수명을 평가하였다.

압축영역의 피로해석은 콘크리트를 대상으로 수행하며, 콘크리트의 피로파괴를 일으키는 피로반복횟수 N 은 식 (31)과 같다.

$$\log_{10} N = C_1 \frac{\left(1 - \frac{\sigma_{\max}}{C_5 f_{rd}}\right)}{\left(1 - \frac{\sigma_{\min}}{C_5 f_{rd}}\right)} \quad (31)$$

여기서 f_{rd} 는 파괴압축강도, σ_{\max} 는 최대압축응력, σ_{\min} 는 최소압축응력이며, C_5 는 피로강도계수로 콘크리트에 대한 권장 값은 1.0이다.

C_1 은 응력 범위에 의한 계수로 공기 중의 구조물은 12.0을 압축-압축 범위의 응력 변화를 갖는 수중 구조물은 10.0, 압축-인장 범위의 응력 변화를 갖는 수중 구조물은 8.0을 적용한다.

만약, $\log N$ 의 값이 식 (32)의 X 보다 큰 값을 가지는 경우

$$X = \frac{C_1}{1 - \frac{\sigma_{\min}}{C_5 f_{rd}} + 0.1 C_1} \quad (32)$$

$\log N$ 의 값에 C_2 를 곱함으로써 피로반복횟수를 증가시킬 수 있으며 C_2 는 식 (33)과 같이 구한다.

$$C_2 = (1 + 0.2(\log_{10} N - X)) > 1.0 \quad (33)$$

인장영역의 피로해석은 철근을 대상으로 수행하며, 철근의 피로파괴를 일으키는 하중의 반복횟수는 N 은 식 (34)와 같다.

$$\log_{10} N = C_3 - C_4 \log_{10} \Delta \sigma \quad (34)$$

여기서 $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, C_3 와 C_4 는 곡률반경, 보강유형, 환경조건에 따라 결정한다.

Table 3은 철근의 부식 환경조건에 따른 분류이며, 환경조건이 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XA1, XA2인 직선 철근의 경우 $C_3 = 19.6$, $C_4 = 6.0$ 을 사용한다. 곡률반경이 3ϕ 미만이고 환경조건이 X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XA1, XA2인 곡선 철근의 경우 $C_3 = 15.9$, $C_4 = 4.8$ 을 사용하며, 곡률반경이 3ϕ 이상인 곡선 철근의 경우 선형 보간된 값을 사용한다. 환경조건이 XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3, XF2, XF3, XF4, XA3, XSA인 직선 철근의 경우 Table 4에 따라 C_3 와 C_4 의 값을 정한다.

Table 3 Exposure classes related to environmental conditions

Class designation	Description of the environment	Informative examples where exposure classes may occur
1. No risk of corrosion attack		
X0	For concrete without reinforcement or embedded metal : all exposures except where there is freeze/thaw, abrasion or chemical attack For concrete with reinforcement or embedded metal : very dry	Concrete exposed to very low air humidity
2. Corrosion induced by carbonation		
XC1	Dry or permanently wet	Concrete permanently submerged in water
XC2	Wet, rarely dry	Concrete surfaces subject to long-term water contact Many foundations
XC3	Moderate humidity	External concrete sheltered from rain
XC4	Cyclic wet and dry	Concrete surfaces subject to water contact, not within exposure class XC2
3. Corrosion induced by chlorides		
XD1	Moderate humidity	Concrete surfaces exposed to airborne chlorides
XD2	Wet, rarely dry	Concrete components exposed to industrial waters containing chlorides
XD3	Cyclic wet and dry	Concrete components exposed to spray containing chlorides

4. Corrosion induced by chlorides from sea water		
XS1	Exposed to airborne salt but not in direct contact with sea water	Structures near to or on the coast
XS2	Permanently submerged	Parts of marine structures
XS3	Tidal, splash and spay zones	Parts of marine structures
5. Freeze/Thaw attack		
XF1	Moderate water saturation without de-icing agent	Vertical concrete surfaces exposed to rain and freezing
XF2	Moderate water saturation, with de-icing agent	Vertical concrete surfaces exposed to freezing and airborne de-icing agents
XF3	High water saturation, without de-icing agents	Horizontal concrete surfaces exposed to rain and freezing
XF4	High water saturation, with de-icing agents or seawater	Concrete surfaces exposed to direct spray containing de-icing agents and freezing Splash zone of marine structures exposed to freezing
6. Chemical attack		
XA1	Slightly aggressive chemical environment according to EN 206-1, Table 2	Concrete exposed to natural soils and ground water
XA2	Moderately aggressive chemical environment according to EN 206-1, Table 2	Concrete exposed to natural soils and ground water
XA3	Highly aggressive chemical environment according to EN 206-1, Table 2	Concrete exposed to natural soils and ground water
7. Special aggressive environment		
XSA	Structures exposed to strong chemical attack which are not covered by the other classes and will require additional protective measures	Structures exposed to fluids with low pH-value

Table 4 Value according to the level of stress variations

	$\Delta\sigma > 235$	$235 > \Delta\sigma > 65$	$65 > \Delta\sigma > 40$
C_3	15.7	13.35	16.97
C_4	4.5	3.5	5.5

전단력에 의한 피로파괴 반복횟수는 N 은 식 (35)와 같다.

$$\log_{10}N = C_1 \frac{\left(1 - \frac{V_{\max}}{V_{cd}}\right)}{\left(1 - \frac{V_{\min}}{V_{cd}}\right)} \quad (35)$$

콘크리트 파괴전단강도 V_{cd} 는 식 (36)과 같다.

$$V_{cd} = 0.3 \left(f_{tn} + \frac{k_A A_s}{\gamma_c b_w d} \right) b_w d k_v \leq 0.6 f_{tn} b_w d k_v \quad (36)$$

여기서 f_{tn} 은 콘크리트 인장강도, A_s 는 인장축 철근 단면적, b_w 는 부재 폭, d 는 유효깊이, $k_A = 100MPa$, $k_v = 1.5 - d/d_1$ ($1.0 \leq k_v \leq 1.4$), $d_1 = 1,000mm$ 이며, γ_c 은 재료계수로 재료의 강도 및 단면의 불확실성을 보정하기 위하여 사용한다. 재료 계수는 부식 또는 기계적 열화에 의한 강도 저하와는 별도로 적용되며 그 값은 Table 5와 같다.

Table 5 Material Coefficients for Concrete and Reinforcement

Limit States		Ultimate ULS	Fatigue FLS	Accidental ALS	Serviceability SLS
Reinforced concrete	γ_c	1.35	1.35	1.10	1.00
Steel reinforcement	γ_s	1.10	1.00	1.00	1.00
Plain concrete/grout, fibre reinforced concrete/grout	γ_c	1.50	1.50	1.20	1.00

3.6 누적손상법

일반적으로 피로수명은 일정진폭의 반복하중하의 수명을 대상으로 하는 것이 많다. 그러나 부유식 구조물과 같은 해양 구조물은 불규칙적으로 발생하는 풍하중과 파랑하중에 노출되어 있기 때문에 변동하중하의 수명을 예측하여야 한다. 변동하중에 의한 피로수명의 경우 하중과형에서 피로수명을 지배하는 특성인자를 추출하고 이에 대한 빈도분포를 고려할 필요가 있다.

누적손상법(Cumulative damage rule)은 각기 다른 주기의 하중 성분들에 의한 피로 누적 기여를 조합하였을 때 손상임계값이 되면 피로파괴가 발생한다고 추정한다. 본 논문에서는 누적손상법칙 중에서 많이 적용되고 있는 선형손상법칙(Linear damage rule), 즉 Palmgren-Miner rule에 따라 잔존수명 평가를 수행하였다(Miner, 1945).

연간 파랑의 발생확률이 일정하다고 가정할 경우 i 년차에 어떤 파랑하중에 의해 발생하는 응력 σ 에 의한 피로손상도 d_i 는 식 (37)과 같이 구할 수 있다 (Ostachowicz & Alfredo, 2013).

$$d_i = \frac{n_i(\sigma)}{N_i(\sigma)} \quad (37)$$

여기서 n_i 는 파랑에 의해 응력 σ 이 발생하는 횟수이며, N_i 는 이 응력에 따라 피로파괴가 일어나는 횟수이다.

이때, 단위시간 동안 서로 다른 K 개의 하중에 의해 구조물에 발생한 피로손상도를 대수적으로 합하면 총 피로손상도 D 가 되며, 피로수명 T 는 식 (39)와 같이 구할 수 있다.

$$D = \sum_{j=1}^K d_{ij} = \sum_{j=1}^K \frac{n_{ij}(\sigma)}{N_{ij}(\sigma)} \quad (38)$$

$$D = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K d_{ij} = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \frac{n_{ij}(\sigma)}{N_{ij}(\sigma)} \leq \eta \quad (39)$$

여기서 η 는 손상임계값으로 점점 및 수리 접근성에 따라 달라지며 그 값은 Table 6과 같다.

Table 6 Limit of cumulative damage ratios

No access for inspection and repair	Below or in the splash zone	Above splash zone
0.33	0.5	1.0

P 년간 대상 구조물이 하중을 받은 경우 식 (39)는 식 (40)과 같이 나타낼 수 있으며, 잔존수명은 $(T-P)$ 가 된다.

$$\eta = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^K \frac{n_{ij}(\sigma)}{N_{ij}(\sigma)} + \sum_{i=P+1}^T \sum_{j=1}^K \frac{n_{ij}(\sigma)}{N_{ij}(\sigma)} \quad (40)$$

잔존수명 예측 과정은 Fig. 16과 같이 나타낼 수 있다.

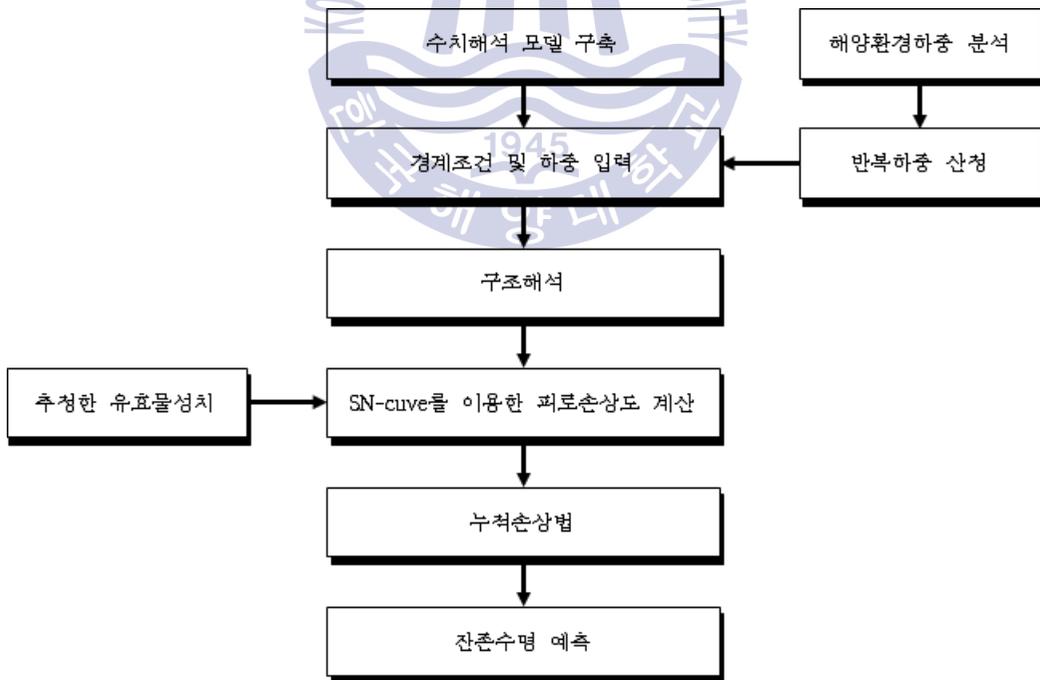


Fig. 16 Flowchart of residual life assessment

제 4 장 현장실험 및 수치해석을 통한 부유식 구조물의 동적특성 추출

4.1 대상구조물 개요

대상구조물은 세로, 가로, 높이가 각각 8m, 25m, 2m의 철근콘크리트 구조이며, 내부는 MC-PS FORM으로 충전되어 균열에 의한 해수의 내부 유입을 방지하고 있다. 네 모서리에 설치된 직경 28mm의 체인에 의해 계류되고 있으며, 2개는 해저면에 매설된 앵커블럭에 연결되어 있고 나머지 2개는 육상의 도교인 양대 하부에 연결되어 있다.

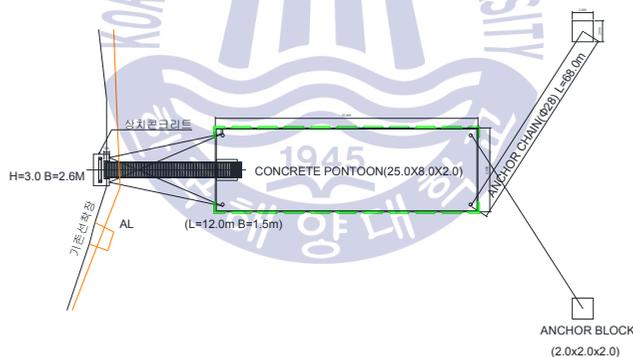


Fig. 17 Location plan

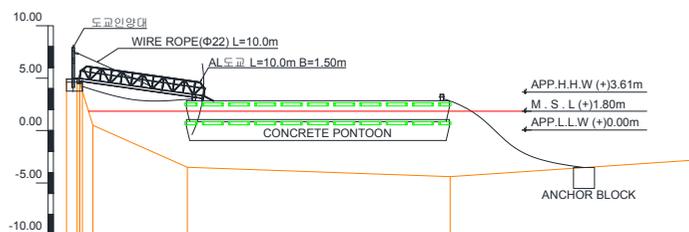


Fig. 18 Side elevation

4.2 현장실험을 통한 부유식 구조물의 동적특성 추출

4.2.1 현장실험 개요

현장실험은 2012년, 2013년, 2014년, 2016년 총 4회 실시하였으며, 1차 실험 후 2012년 9월에 발생한 태풍 산바의 영향으로 연결도교가 파손되어 Fig. 19와 같이 기존의 외해방향에서 내륙방향으로 이전 설치되었다.

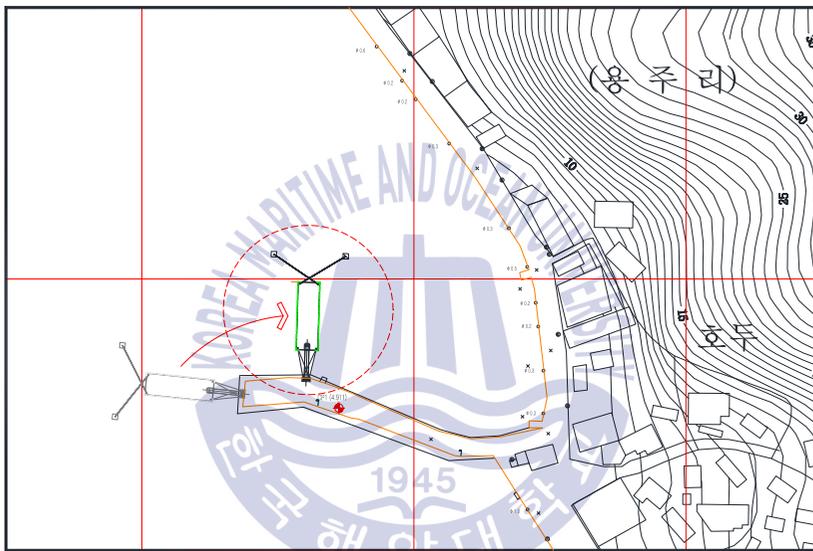


Fig. 19 Changed structure location



(a) 1st field test (2012.07)



(b) 2nd field test (2013.08)

Fig. 20 Floating structure view

실험장비는 Fig. 21과 같이 가속도 계측을 위해 PCB사의 ICP 타입 가속도계 (PCB 333B40)을 사용하였으며, 구조물의 가진을 위해 PCB사의 ICP 타입 대형 임팩트 해머(PCB 096D50)을 사용하였다. 또한 가속도계와 임팩트 해머로 부터의 데이터 계측 및 저장, 분석을 위하여 지멘스사의 데이터 로거(LMS SCADAS Mobile)와 노트북을 사용하였다.



Fig. 21 Testing equipment

대상 구조물의 동적특성을 추출하기 위해 Fig. 22와 같이 대상 구조물의 상판 슬래브를 등간격으로 분할하여 총 35개 지점에서 강제진동시험(Forced vibration test)과 상시진동시험(Ambient vibration test)을 함께 실시하여 정확한 구조물의 동적특성을 추출하였다.

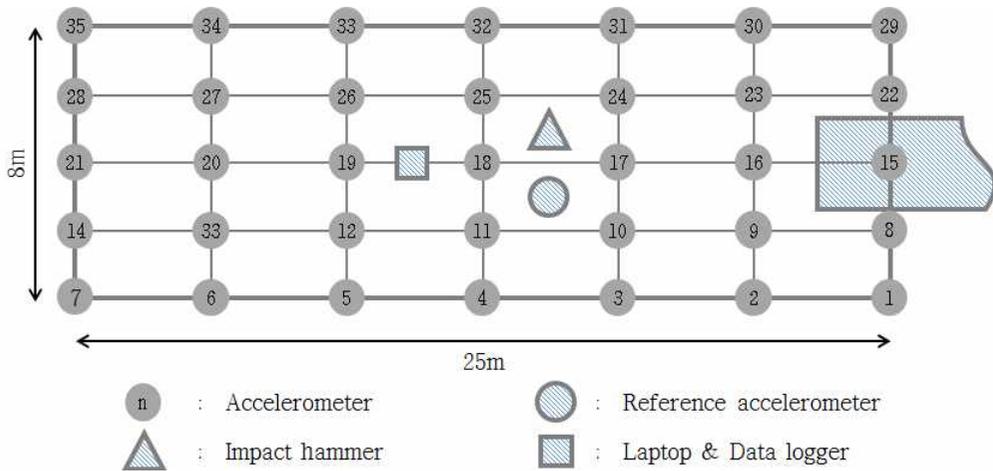


Fig. 22 Modal test configuration

강제진동시험은 입력하중을 제어하고 계측할 수 있는 시험으로 입력하중과 출력응답으로부터 직접 고유진동수 및 모드형상을 추출하는 방법으로 일반적으로 토목구조물의 강제진동은 규모가 큰 구조물의 경우 많은 비용이 소모되고 구조물 전체의 가진이 어려운 단점이 있다.

상시진동시험은 강제진동시험과 달리 입력하중에 대한 정보를 사용하지 않고, 풍하중, 파랑하중 등의 주변하중 요인에 의한 계측응답만을 사용하여 동적 특성을 추출하게 된다. 실제 계측을 통하여 얻게 되는 응답은 입력하중에 대한 가정(Broad-band or White noise)을 완전히 만족시키지 않는다. 즉 상시진동계측 데이터는 임의의 가진원의 주파수 성분에 따라서 상당히 불규칙적인 특징을 갖는다. 따라서 충분히 긴 계측신호의 산술평균값을 취하여 입력하중의 불규칙성을 완화 또는 제거한다.

강제진동시험의 경우 1회에 7개 지점의 응답 가속도와 1개 지점의 입력 하중을 계측하였고 응답 측정 지점을 옮기며 5세트의 시험을 진행하였다. 노이즈 감소를 위하여 1회 계측 시 3번의 타격을 실시하고 산술평균값을 취하였다. 데이터 수집조건은 1차 측정의 경우 Sampling rate 200Hz, Spectral line 2048, Resolution 0.048828Hz로 설정하였으나 관심주파수의 범위가 25Hz 이하의 범위로 분석되어 2~4차 측정에서는 Sampling rate를 100Hz로 설정하였으며, 1차 측

정과의 통일성을 위하여 Spectral line과 Resolution을 각각 1024와 0.048828Hz로 설정하였다.

상시진동시험은 1회 측정 시 7개 지점과 기준 지점의 가속도에서 3,600초 동안 데이터를 수집하였으며, 데이터 수집조건은 강제진동시험과 동일하게 설정하였다.

4.2.2 강제진동시험 - PP(Peak picking) 기법

강제진동시험은 Fig. 23과 같이 응답위치를 고정 시키고 해머의 가격 포인트를 이동하는 방법과 가진위치를 고정시키고 이에 따른 응답을 구조물의 여러 위치에서 계측하는 방법이 있다(Avitabile, 2001).

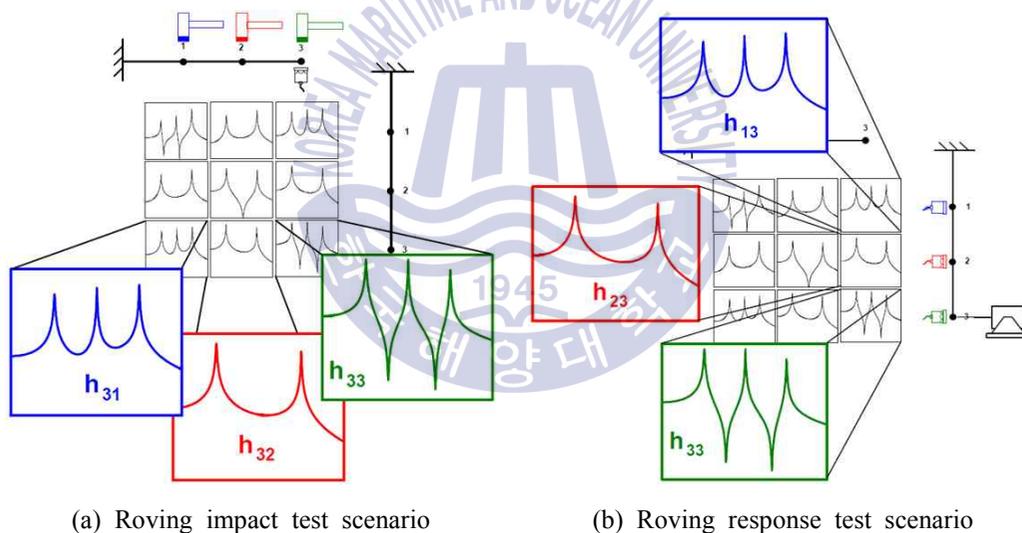


Fig. 23 Modal Impact Test

주파수 응답함수(Frequency response function, FRF)는 동적 시스템의 입력과 출력의 관계를 나타내는 함수로서 입력신호 $F(\omega)$ 와 출력 신호 $X(\omega)$ 는 $H(\omega)$ 를 통해 식 (41)의 관계를 갖으며 변위, 속도, 가속도뿐 만 아니라 압력, 힘 등 다양한 물리량에 대해 계측 가능하며, 각 신호들의 상관성을 파악할 수 있다.

$$[X(\omega)] = [H(\omega)][F(\omega)] \quad (41)$$

시간영역에서 입력하중과 출력응답을 계측한 후 FFT로 치환하여 주파수영역에서 식(42)를 이용하여 주파수 응답함수 $H(\omega)$ 를 계산한다.

$$H_{xf}(\omega) = \frac{S_{xf}(\omega)}{S_{ff}(\omega)} \quad (42)$$

여기서, $S_{xf}(\omega)$ 는 입력과 출력신호의 상호스펙트럼(Cross-spectrum), $S_{ff}(\omega)$ 는 입력신호의 자기스펙트럼(Auto-spectrum)을 의미한다.

주파수 응답함수를 생성한 후 구조물의 동적 거동에 가장영향을 많이 미치는 저차 고유진동수 및 모드형상을 추출한다.

4.2.3 상시진동시험 - FDD(Frequency domain decomposition) 기법

FDD 기법은 백색잡음입력(White noise excitation)을 가정하여 출력스펙트럼밀도행렬(Output spectral density matrix)에 특이치 분해(Singular value decomposition, SVD)를 통하여 모달파라미터를 추출하는 방법이다(Btel et al., 2003).

측정된 출력신호의 파워스펙트럼밀도행렬 $[X(\omega)]$ 는 식(43)과 같이 주파수응답함수행렬 $H(\omega)$ 과 미지의 입력에 대한 파워스펙트럼밀도행렬 $[Y(\omega)]$ 의 함수로 나타낼 수 있으며, 여기서 \overline{H} 는 켈레복소수를 의미한다.

$$[X(\omega)] = [\overline{H}(\omega)][Y(\omega)][H(\omega)]^T \quad (43)$$

입력치의 개수를 r 이라하고 출력 값의 개수를 m 이라하면 각 각주파수 ω 에 대하여 행렬 $[X]$, $[Y]$, $[H]$ 의 크기는 각각 $m \times m$, $r \times r$, $m \times r$ 이고, 상시진동 모달 해석에서 일반적인 가정은 백색잡음 입력이며 행렬 $[H]$ 는 식 (45)와 같이 극치 λ_k 와 잔차(Residual) $[P_k]$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$[Y(\omega)] = [W] \quad (44)$$

$$[H(\omega)] = \sum_{k=1}^n \frac{[P_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[\overline{P}_k]}{j\omega - \lambda_k} \quad (j^2 = -1) \quad (45)$$

저감쇠시스템의 경우 위 식을 이용하여 $[X]$ 가 $[P_k][W][\overline{P}_k]$ 에 의해 지배됨을 알 수 있으며, 이 경우 $[P_k][W][\overline{P}_k]$ 는 식 (46)과 같이 모드형상벡터 $\{\Phi_k\}$ 와 비례한다.

$$[P_k][W][\overline{P}_k] = d_k \{\Phi_k\} \{\Phi_k\}^T \quad (46)$$

여기서 d_k 는 임의의 상수이다. 특정 각주파수 ω 에 대하여 제한된 개수(NM(ω))로 표시)의 모드(일반적으로 두개 이하)만이 에너지를 가지므로 출력신호의 파워스펙트럼밀도행렬(또는 스펙트럼행렬)은 식 (47)과 같다.

$$[X(\omega)] = \sum_{k \in NM(\omega)} \frac{d_k \{\Phi_k\} \{\Phi_k\}^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\overline{d}_k \{\overline{\Phi}_k\} \{\overline{\Phi}_k\}^T}{j\omega - \overline{\lambda}_k} \quad (47)$$

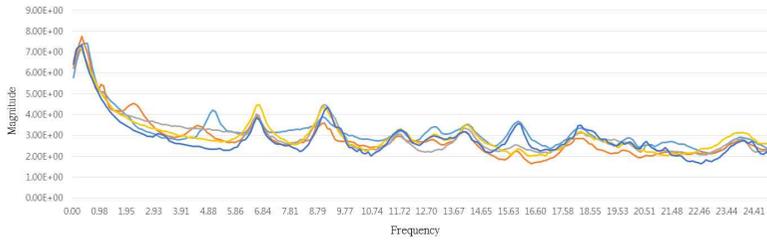
실제 계측 시 상시진동 측정값을 이용하여 기지의 각 주파수 ω_i 에 대하여 출력 $[\hat{X}(\omega_i)]$ 의 파워스펙트럼밀도행렬을 산정할 수 있다. 출력신호의 스펙트럼행렬은 대칭(Symmetric)이므로 식 (48)과 같이 특이치 분해 할 수 있으며, 여기서 $[U_i]$ 는 Singular벡터의 행렬이며 $[\Sigma_i]$ 는 Singular값의 대각행렬이다.

$$[X(\omega_i)] = [U_i][\Sigma_i][\overline{U}_i]^T \quad (48)$$

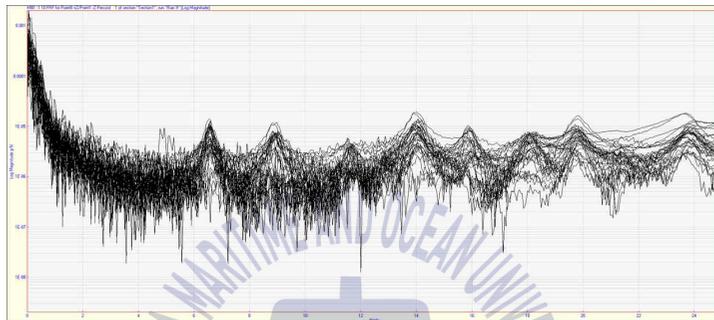
피크 주변에서 오직 하나의 모드만이 지배한다면 위 식의 우변은 하나의 항이 남고 첫 번째 Singular벡터는 모드형상이 되며, 피크 주변에서 두 모드가 지배적이고 기하학적으로 직교일 경우, 즉 독립된 두 모드의 주파수가 매우 근접할 경우 처음 두 개의 Singular벡터가 모드형상이 된다.

4.2.4 동적특성 추출

상시진동시험과 강제진동시험으로 계측한 데이터는 FDD기법 및 PP기법을 이용하여 분석하였으며, Fig. 24~ 27과 같이 각 측정시점의 고유진동수 및 모드형상을 추출하였다.



(a) Singular value decomposition

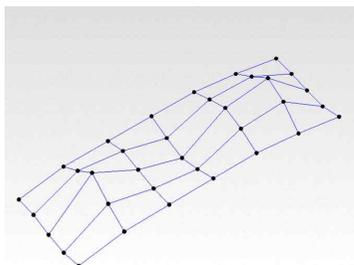


(b) Frequency response function

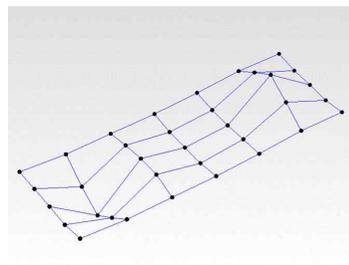


(c) Mode1 [6.541Hz]

(d) Mode2 [8.981Hz]

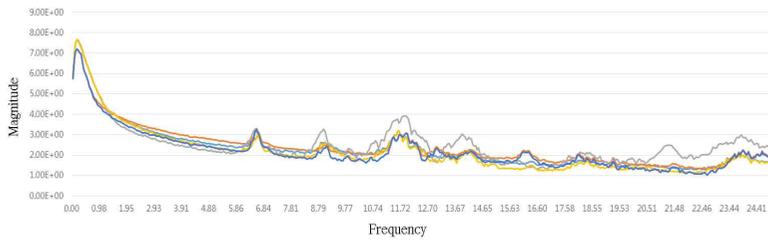


(e) Mode3 [11.62Hz]

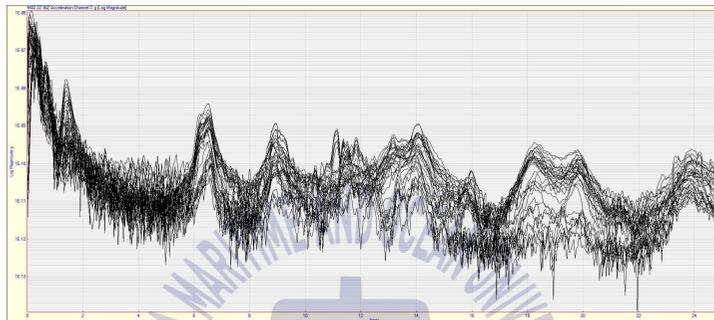


(f) Mode4 [14.020Hz]

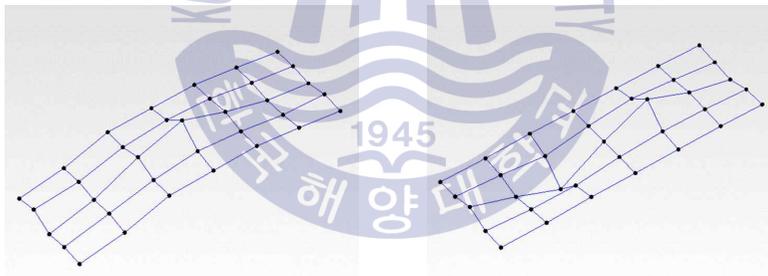
Fig. 24 Natural frequency & mode shape in 2012 year



(a) Singular value decomposition

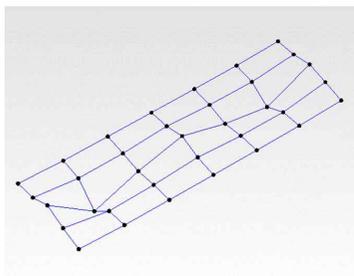


(b) Frequency response function

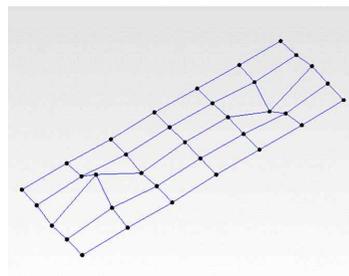


(c) Mode1 [6.451Hz]

(d) Mode2 [8.891Hz]

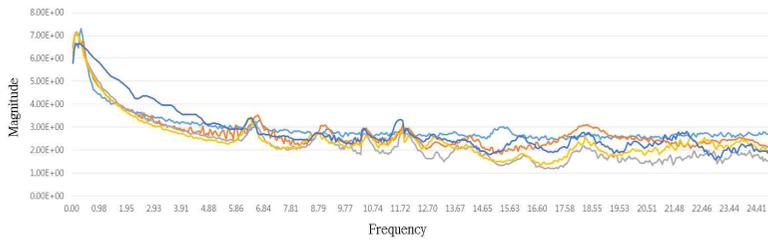


(e) [Mode3 11.57Hz]

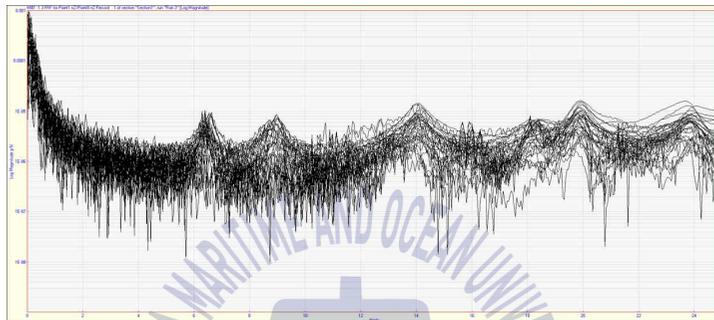


(f) Mode4 [13.96Hz]

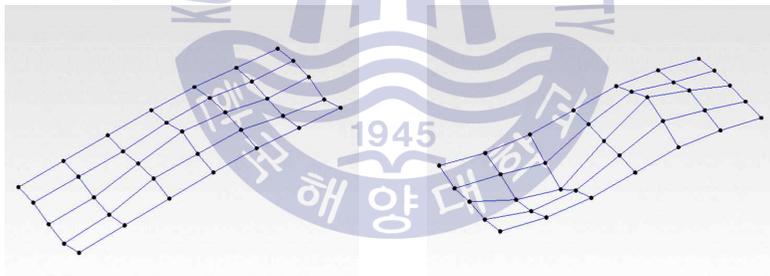
Fig. 25 Natural frequency & mode shape in 2013 year



(a) Singular value decomposition

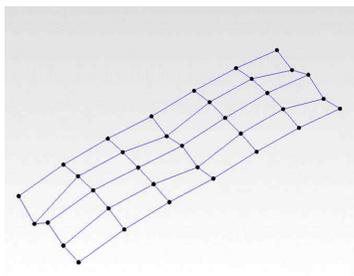


(b) Frequency response function

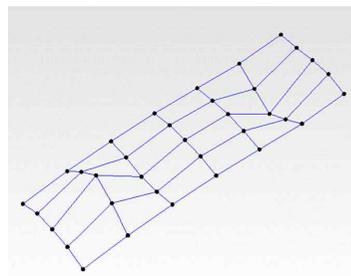


(c) Mode1 [6.351Hz]

(d) Mode2 [8.691Hz]

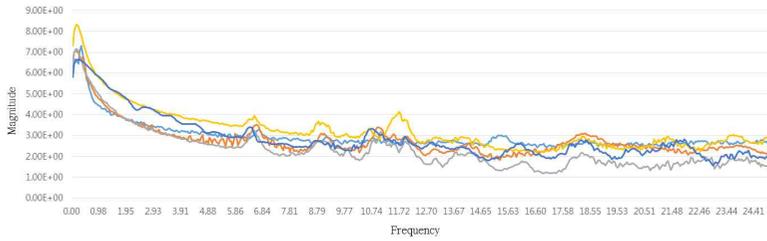


(e) Mode3 [11.37Hz]

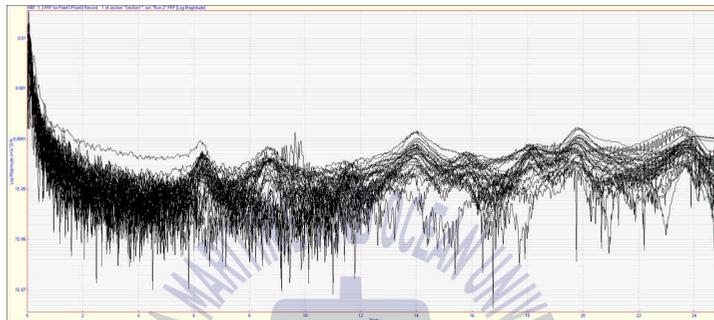


(f) Mode4 [13.91Hz]

Fig. 26 Natural frequency & mode shape in 2014 year



(a) Singular value decomposition

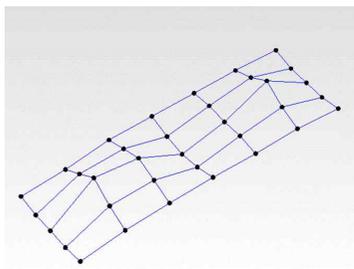


(b) Frequency response function

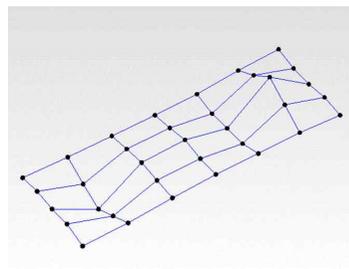


(c) Mode1 [6.311Hz]

(d) Mode2 [8.621Hz]



(e) Mode3 [11.27Hz]



(f) Mode4 [13.84Hz]

Fig. 27 Natural frequency & mode shape in 2016 year

대상구조물의 현장실험 수행 시점의 고유진동수는 Table 7과 같다. 사용연수의 증가에 따라 고유진동수의 감소를 확인할 수 있었으며, 2013년도와 2014년도 사이에 고유진동수의 감소폭이 큰 것을 확인할 수 있다.

Table 7 Change of natural frequency (unit : Hz)

Year	Mode1	Mode2	Mode3	Mode4
2012	6.54	8.98	11.62	14.02
2013	6.45	8.89	11.57	13.96
2014	6.35	8.69	11.37	13.91
2016	6.31	8.62	11.27	13.84

4.3 수치해석을 통한 부유식 구조물의 동적특성 추출

4.3.1 수치해석 개요

본 연구에서 부유식 구조물의 수치해석을 위하여 ANSYS Workbench를 사용하였으며, 수치해석 과정은 Fig. 28과 같다(ANSYS, 2010). 1단계에서는 Static Structural을 이용하여 대상 구조물의 구조해석 모델링을 실시하였다. 모델링은 구조물을 구성하는 슬래브 및 벽체, 보, 기둥 등 모든 부재를 포함한다. 구조해석 모델링을 바탕으로 구조해석 매쉬를 생성하고 질량, 관성 등 부유식 구조물의 물리적 정보를 생성한다. 2단계에서는 AQWA를 이용하여 Hydrodynamic 해석을 위한 모델링을 실시한다. Hydrodynamic 해석에서는 외부 형상만이 필요하므로 1단계에서 작성한 구조해석 모델에서 내부 부재를 제거하여 Hydrodynamic 해석을 위한 모델링을 실시하고 매쉬를 생성한다. 이때, Hydrodynamic 해석 모델에서는 내부 부재가 제거되었으므로, 1단계의 구조해석 모델로부터 생성된 관성, 질량 등의 부유식 구조물의 물리적 정보를 입력해 주어야 한다. Hydrodynamic 해석에서 파랑하중에 따른 부유식 구조물의 파압은 관성력과 균형이 맞아야 하고 해석 모델의 관성력은 질량행렬과 관성행렬을 기준으로 계산되므로, Hydrodynamic 해석 모델과 구조해석 모델 사이의 질량과 관성을 일치시켜주는 것이 중요하다. 3단계에서는 2단계에서의 Hydrodynamic 해석 모델과

입력된 파랑하중에 대해 Hydrodynamic 해석을 수행하고, 해석결과인 부유식 구조물의 파랑 운동과 파압 분포를 산출한다. 4단계에서는 3단계 Hydrodynamic 해석으로부터 산출된 파압을 1단계에서 생성된 구조해석 모델에 외적하중으로 작용시키는 파압 매핑(Load mapping)을 수행한다. 5단계에서는 4단계에서 외적하중으로 작용된 파압에 대해 부유식 구조물의 구조해석을 실시하고, 파랑하중에 의한 변형도 및 부재별 응력을 산출한다. 6단계에서는 Static Structural과 Modal의 연성해석(Coupled-field analysis)을 통하여 구조해석 모델의 고유진동수 및 모드형상을 추출하게 된다(이두호 et al. 2011).

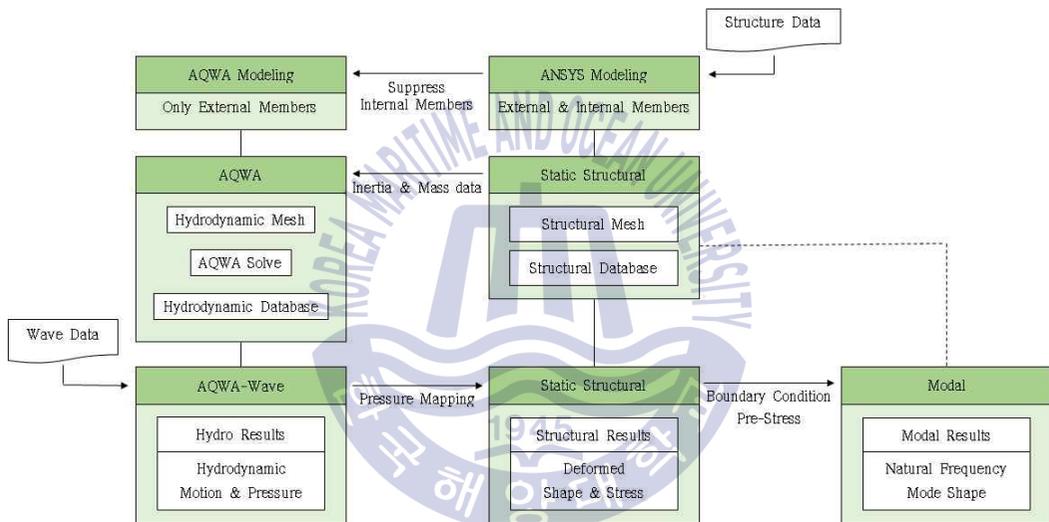


Fig. 28 Analysis process

4.3.2 수치해석 모델링

수치해석 모델은 Fig. 29, Table 8과 같이 대상구조물의 구조도면 및 기본제원에 의해서 모델링하였다. Static Structural과 AQWA 모델링은 Fig. 30과 같이 수행하였다. Static Structural에서 보 및 기둥은 Line 요소로 슬래브 및 벽체는 Surface 요소로 모델링하였으며, 내부 충전재는 Point mass를 이용하여 질량만을 표현하였다. 수치해석 모델의 초기 강성은 대상구조물의 설계강도인 콘크리트 강도 35C에 해당하는 탄성계수 $2.8802E+10 N/m^2$ 로 설정하였다.

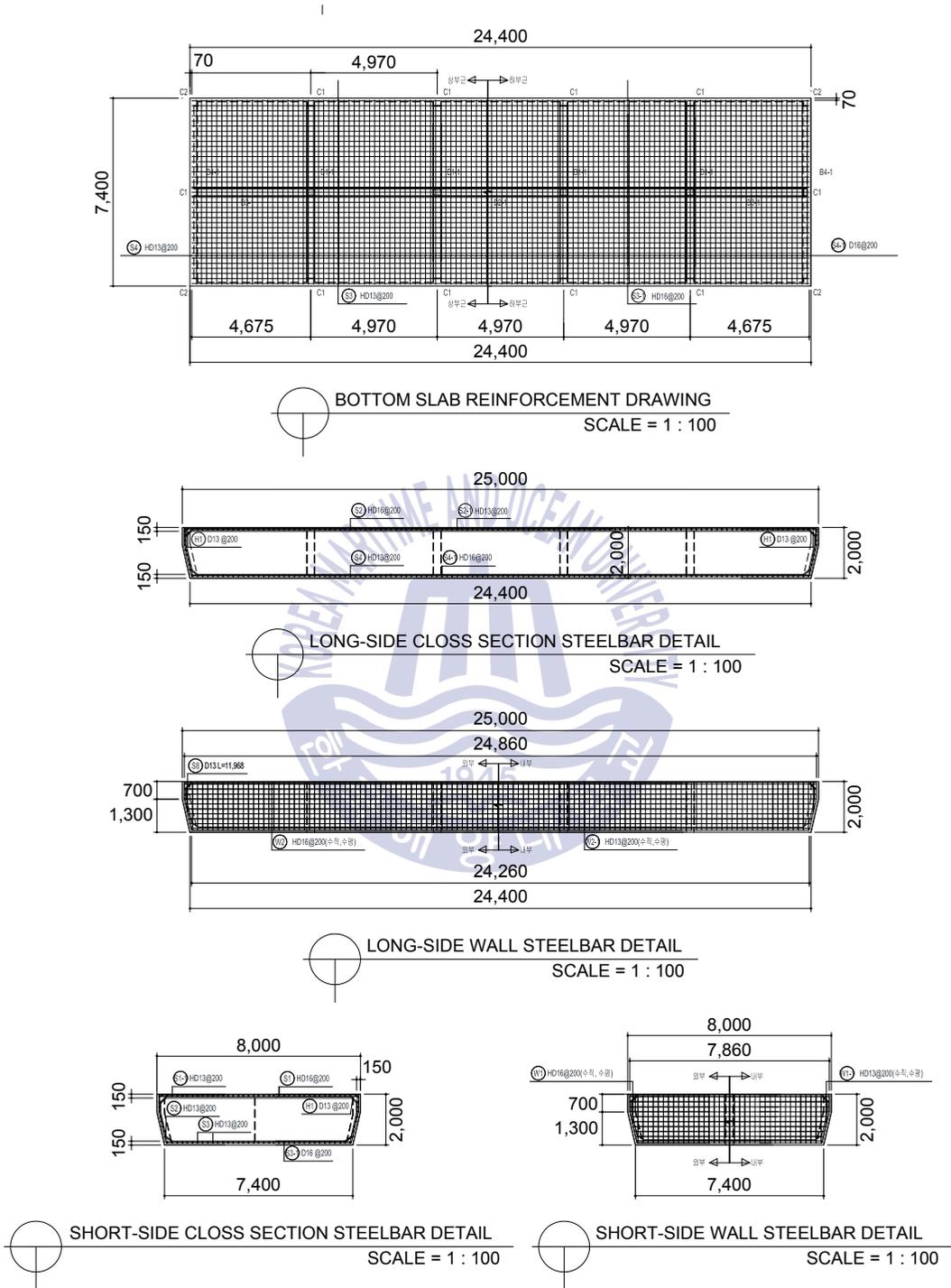
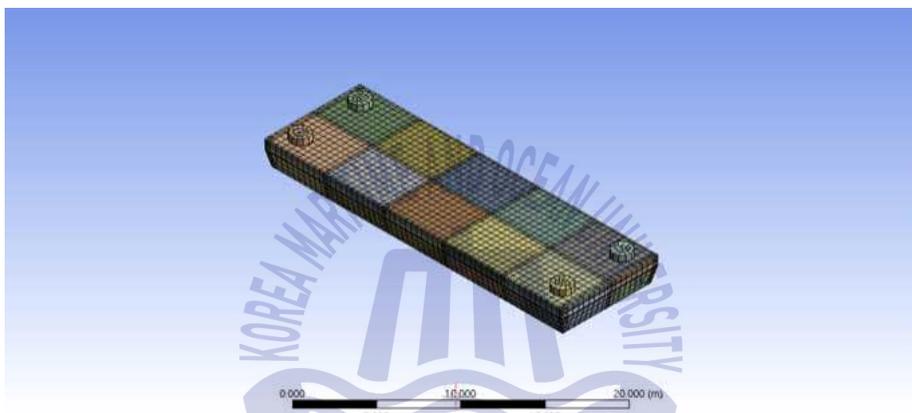


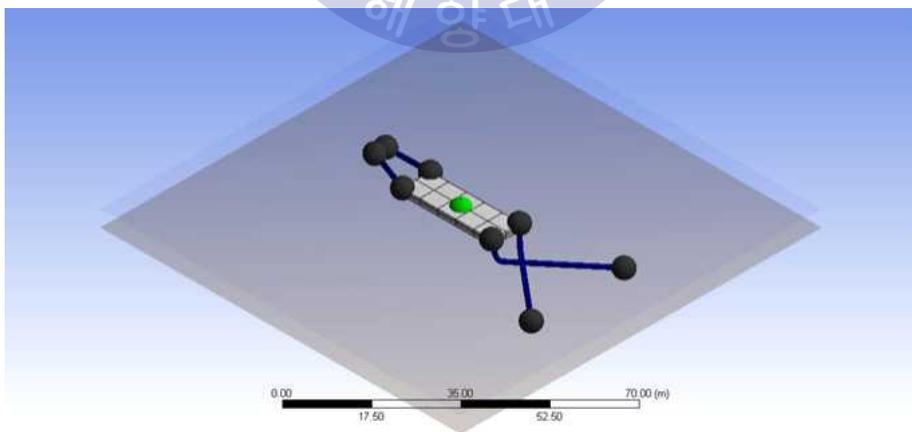
Fig. 29 Structural drawing

Table 8 Structure specification

Concrete wall thickness	0.15m
Beam & Column size	0.3m×0.3m
Depth	6.5m
Draft	1.2m
Poisson's ratio	0.167
Density	2,400kg/m ³



(a) Static structural modelling



(b) AQWA modelling

Fig. 30 Numerical modelling

4.3.3 고유치 해석

대상 구조물의 고유치 해석을 통하여 추출한 고유진동수와 모드형상은 Fig. 31 과 같으며, 6.0621Hz에서 1차 모드를, 8.2621Hz에서 2차 모드, 10.839Hz에서 3차 모드, 13.260Hz에서 4차 모드가 추출되었다. Table 9는 2012년도 현장실험에서 추출한 고유진동수와 수치해석으로 구한 고유진동수를 비교한 것으로 오차는 5.42~7.99%를 나타내었다.

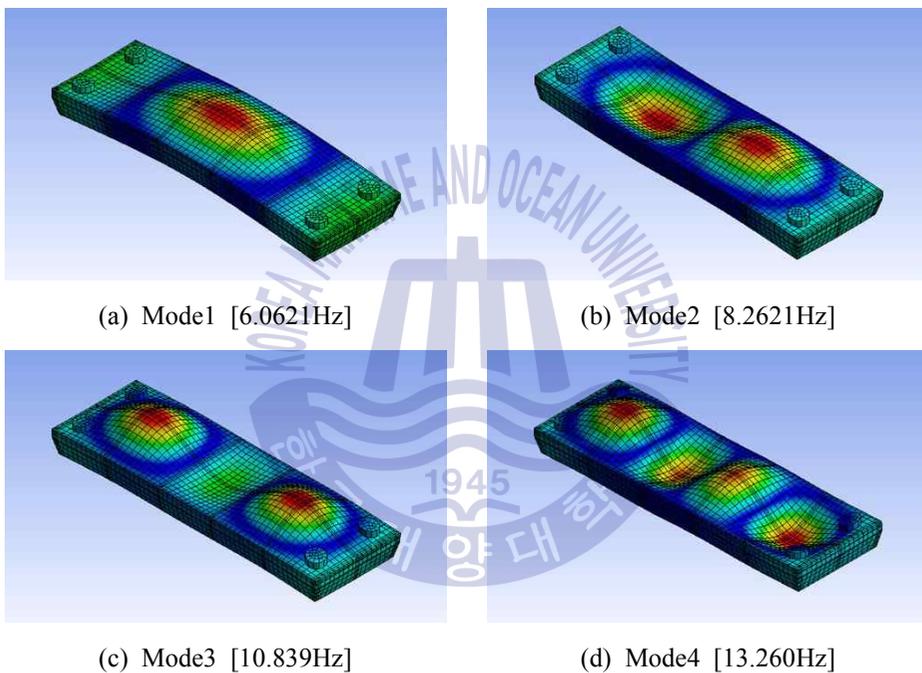


Fig. 31 Natural frequency & mode shape

Table 9 Comparing the natural frequencies of the field test and numerical analysis

	Field test (Hz)	Numerical analysis (Hz)	Error (%)
Mode1	6.54	6.0621	7.31
Mode2	8.98	8.262	7.99
Mode3	11.62	10.839	6.72
Mode4	14.02	13.260	5.42

제 5 장 부유식 구조물의 손상탐지 및 유효물성치 추정

5.1 개요

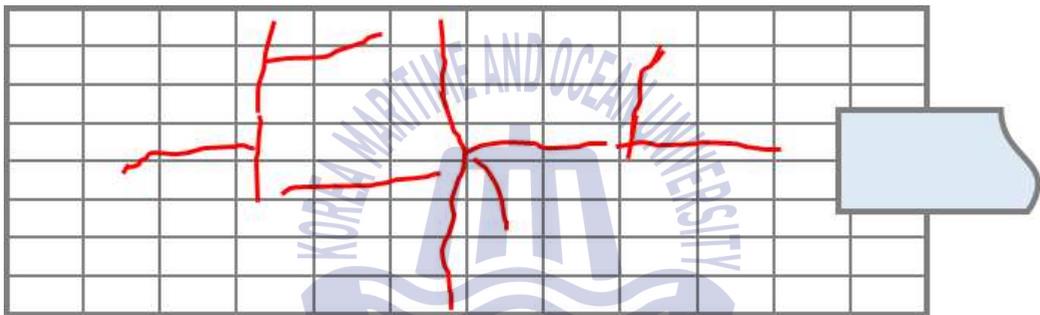
본 연구에서 손상탐지는 각 모드별 손상탐지를 수행하여 손상지수를 산술적으로 평균하여 표준화시킨 결과를 사용하였다. 변형에너지를 이용한 손상탐지 기법을 적용하였기 때문에 플레이트의 곡률이 변하는 부분에서 손상이 발생할 때 부재의 변형에너지가 다른 부재보다 현저히 작아지기 때문에 손상탐지 알고리즘 적용 시 오류가 발생할 수 있으나, 다수의 모드를 사용하면 이러한 오류를 줄일 수 있다.

현장실험 수행 시 35개의 지점에서 동적특성을 추출하였기 때문에 $200m^2$ 의 면적에서 35개의 모달 변위 데이터를 이용하여 구한 손상지수는 아주 작은 표본 크기를 가지게 된다. 따라서 본 논문에서는 35개의 변위 데이터를 117개의 모달 변위로 3차 스플라인 보간(Cubic spline interpolation)을 하였다. 이때, 충분히 많은 수의 변수들의 표본분포가 근사적으로 정규분포에 수렴한다는 중심극한정리(Central Limit Theorem)에 의해서 표본의 크기를 크게 함에 따라, 손상지수의 표본분포는 정규분포에 수렴하게 된다.

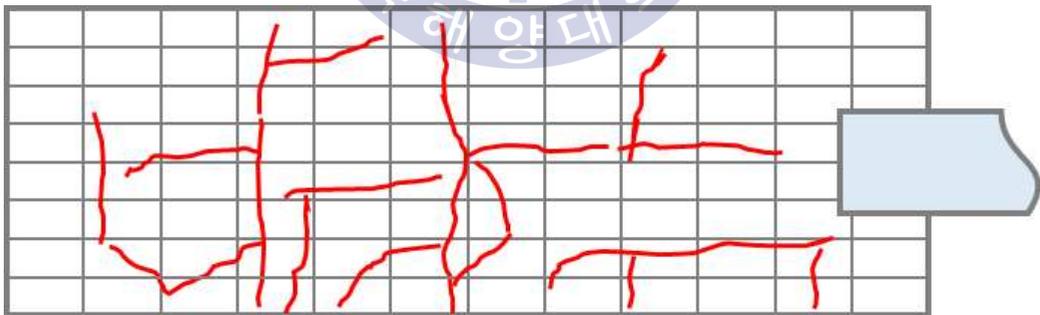
유효물성치 추정은 현장실험으로 추출한 각 시점의 1~4차 고유진동수와 초기 물성치를 가정한 대상구조물의 수치해석 모델을 이용하여 구조계 추정기법을 수행함으로써 대상구조물의 유효물성치를 추정하게 된다. 현장실험으로 추출한 고유진동수와 수치해석모델의 고유진동수를 수렴할 때 수치해석 모델의 물성치 즉, 강성을 대상구조물의 강성으로 간주한다.

5.2 부유식 구조물의 손상탐지

3차년도 현장실험 수행 시 Fig. 32(a)와 같이 균열이 발생한 것을 확인 할 수 있었으며, 발생한 균열이 하중 및 충격에 의한 구조적 균열인지, 마감재의 수축에 의한 표면 균열인지를 판단하기 위하여 균열도를 작성하고 2012년도와 2014년도 동적 특성 데이터를 이용하여 손상탐지 결과와 비교를 하였다. 또한 Fig. 32(b)와 같이 2016년도 현장실험 수행 시 균열도를 작성하여 균열의 진전을 파악하였으며, 2012년도와 2016년도, 2014년도와 2016년도에 대해 각각 손상탐지를 수행하여 균열에 의한 대상 구조물의 구조적 영향을 분석하였다.



(a) Crack drawing of 2014 year



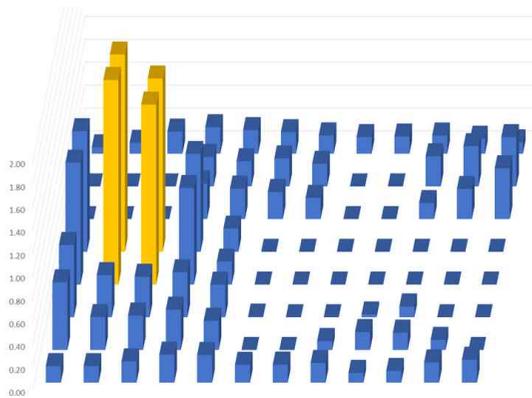
(b) Crack drawing of 2016 year

Fig. 32 Crack drawing of test structure

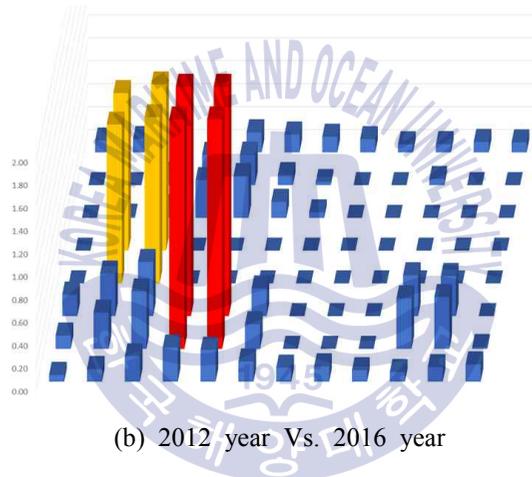
2012년도와 2014년도 동적 특성 데이터를 이용하여 손상탐지 수행 결과는 Fig. 33(a)와 같이 좌측 중앙부에서 손상지수 1.5~1.7의 손상이 탐지되었다. 이를 통하여 좌측 중앙부에서 발생한 균열이 대상 구조물의 강성에 영향을 주는 구조적 균열이며 다른 위치에서 발생한 균열은 마감재에 의한 표면 균열로 판단하였다. 또한 Fig. 33(b)는 2012년도와 2016년도의 동적 특성 데이터를 이용하여 손상탐지 수행결과로 2014년도에서 탐지된 손상과 함께 좌측 하부에 손상지수 2.2~2.3의 새로운 손상이 탐지되었으며, Fig. 32(b)에서 2016년도 균열도에서 좌측하부에 발생한 균열 위치와 동일한 것을 알 수 있다.

Fig. 33(c)는 2014년도와 2016년도 동적 특성 데이터를 이용하여 손상탐지를 수행한 결과로 좌측하부에서 손상지수 2.2~2.4의 손상이 탐지되었고 2012년도와 2016년도 손상탐지 수행결과 새로 발생한 손상 위치와 동일한 것을 확인할 수 있으며, 각각의 시점에 대한 손상탐지 결과 비교를 통하여 손상탐지 알고리즘의 신뢰성을 검증할 수 있다.

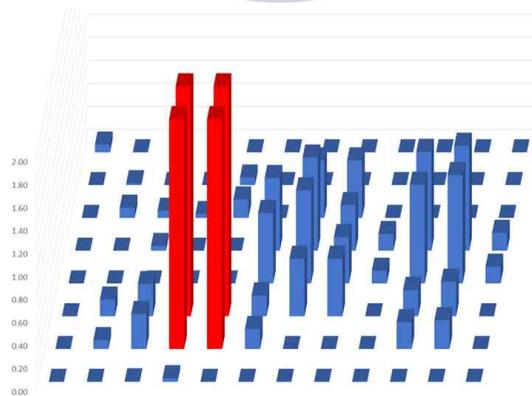




(a) 2012 year Vs. 2014 year



(b) 2012 year Vs. 2016 year



(c) 2014 year Vs. 2016 year

Fig. 33 Result of damage detection

5.3 유한요소모델 수렴 과정을 통한 유효물성치 추정

각 시점의 대상구조물의 강성은 수치해석모델의 강성을 동일하게 3번 업데이트하여 추정하였으며, 그 과정은 Table 10 ~ 13과 같다.

Table 10 System Identification result of 2012 year

Mode	Frequency of target structure (Hz)	Updated frequency(Hz)		Error (%)	
		Iter. 1	Iter. 3	Initial	Final
1	6.54	6.0621	6.5096	-7.3073	-0.4648
2	8.98	8.2621	8.8716	-7.9944	-1.2071
3	11.62	10.839	11.639	-6.7212	0.1635
4	14.02	13.260	14.239	-5.4208	1.5621
Elastic modulus (N/m ²)	Initial value	Updated value			
		Iter. 1		Iter. 3	
	2.8802E+10	2.8802E+10		3.3214E+10	

Table 11 System identification result of 2013 year

Mode	Frequency of target structure (Hz)	Updated frequency(Hz)		Error (%)	
		Iter. 1	Iter. 3	Initial	Final
1	6.45	6.0621	6.4566	-6.0140	0.1023
2	8.89	8.2621	8.7794	-7.0630	-1.0191
3	11.57	10.839	11.544	-6.3181	-0.2247
4	13.96	13.260	14.123	-5.0143	1.1676
Elastic modulus (N/m ²)	Initial value	Updated value			
		Iter. 1		Iter. 3	
	2.8802E+10	2.8802E+10		3.2675E+10	

Table 12 System identification result of 2014 year

Mode	Frequency of target structure (Hz)	Updated frequency(Hz)		Error (%)	
		Iter. 1	Iter. 3	Initial	Final
1	6.35	6.0621	6.3611	-4.5339	0.1748
2	8.69	8.2621	8.6693	-4.9241	-0.2640
3	11.37	10.839	11.373	-4.6702	0.0264
4	13.91	13.260	13.914	-4.6729	0.0288
Elastic modulus (N/m ²)	Initial value	Updated value			
		Iter. 1		Iter. 3	
	2.88024E+10	2.8802E+10		3.1715E+10	

Table 13 System identification result of 2016 year

Mode	Frequency of target structure (Hz)	Updated frequency(Hz)		Error (%)	
		Iter. 1	Iter. 3	Initial	Final
1	6.31	6.0621	6.3162	-3.9287	0.0983
2	8.62	8.2621	8.6082	-4.1520	-0.1369
3	11.27	10.839	11.293	-3.8243	0.2041
4	13.84	13.260	13.816	-4.1908	-0.1734
Elastic modulus (N/m ²)	Initial value	Updated value			
		Iter. 1		Iter. 3	
	2.8802E+10	2.8802E+10		3.1269E+10	

3번의 업데이트를 수행하였을 때, 오차율은 최대 1.56%로 대상구조물과 거의 일치하였다.

추정한 콘크리트의 강성으로부터 강도를 구하기 위해 KCI2012에서 제안한 강도와 탄성계수 관계식을 이용하였다.

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (49)$$

$$f_{cu} = f_{ck} + \Delta f \quad (50)$$

여기서, E_c 는 활선탄성계수, m_c 는 콘크리트 단위질량이며, f_{cu} 는 재령 28일에서의 콘크리트 평균 압축강도, f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준압축강도이고 Δf 는 식 (51)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta f &= 4 \quad (f_{ck} \leq 40MPa) \\ &= 0.1f_{ck} \quad (40MPa \leq f_{ck} \leq 60MPa) \\ &= 6 \quad (f_{ck} \geq 60MPa) \end{aligned} \quad (51)$$

Fig. 34는 각 시점의 동적특성과 수치해석 모델을 이용하여 구조계 추정기법을 수행한 결과 추정된 탄성계수이다. 2013년도, 2014년도, 2016년도의 탄성계수는 2012년도에 비하여 각각 1.65%, 4.51%, 4.59% 감소된 것으로 2012년도에서 2014년도에서 강성 감소가 비교적 크게 나타났으며, 2016년도에서는 강성의 감소가 거의 없는 것으로 추정되었다.

Fig. 35는 추정된 강성을 KCI2012에서 제안한 강도와 탄성계수의 관계식을 이용하여 강도로 계산한 값으로 2012년도에서 2014년도까지는 강도의 감소폭이 컸으나 2016년도에서는 2014년 대비 0.23%의 강도 감소가 되어 거의 유지되는 것을 알 수 있었다. 이처럼 대상 구조물의 강성 및 강도는 초반에 많은 감소폭을 나타내었으나 2014년도 이후부터는 감소폭이 현저히 감소하여 유지되는 것으로 나타나며, 설계 강도 35MPa보다 충분히 큰 값을 유지하고 있기 때문에 구조 건전성은 양호한 것으로 판단된다.



Fig. 34 Change of elastic modulus

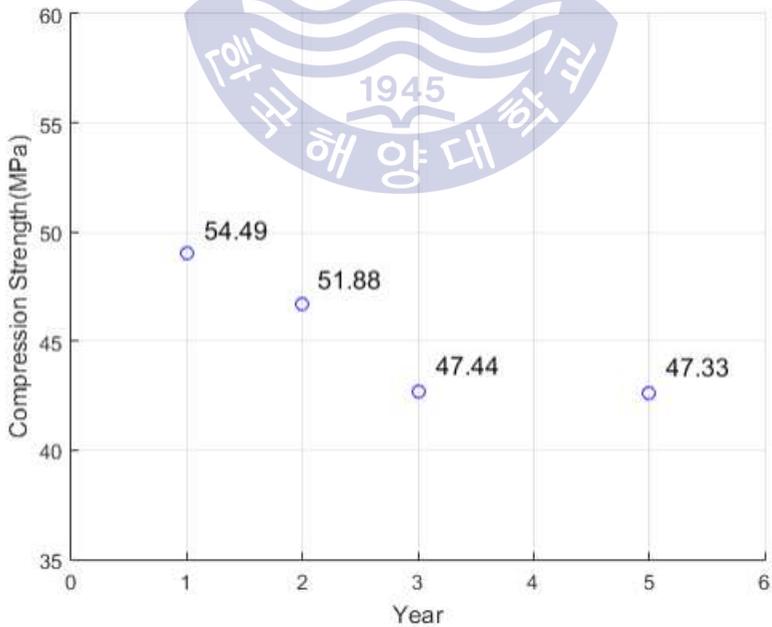


Fig. 35 Change of compression strength

제 6 장 부유식 구조물의 잔존수명 평가

6.1 개요

본 연구에서는 파랑하중에 의한 부유식 구조물의 잔존수명 평가를 위하여 대상구조물의 수치해석 모델을 작성하고 대상구조물 설치 해역의 파랑 데이터를 수치해석 프로그램에 입력하였다. 1~100년 재현주기의 파랑에 따른 부유식 구조물의 응력을 산정하고 DNV-code에 기반한 SN-curve를 이용하여 구조물의 피로손상도를 구하였다.

수치해석은 재현주기별 파랑하중을 입력하여 부유식 구조물의 상부 슬래브, 하부 슬래브에서는 압축응력, 인장응력을 보와 기둥에서는 전단력을 각각 구하였으며, 잔존수명 평가를 위하여 파랑의 연간발생 확률을 가정하고 각 재현주기별 파랑의 파고, 주기에 따라 발생확률을 구하였으며, 피로해석 결과를 누적손상법에 따라 각 파랑하중에 의한 피로손상도와 빈도분포의 비를 대수적으로 합하여 잔존수명 평가를 하였다.

6.2 파랑하중에 의한 부유식 구조물의 구조해석

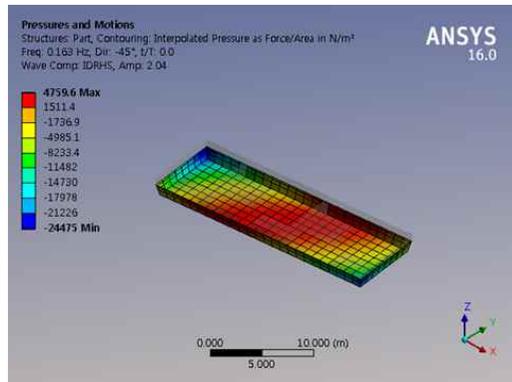
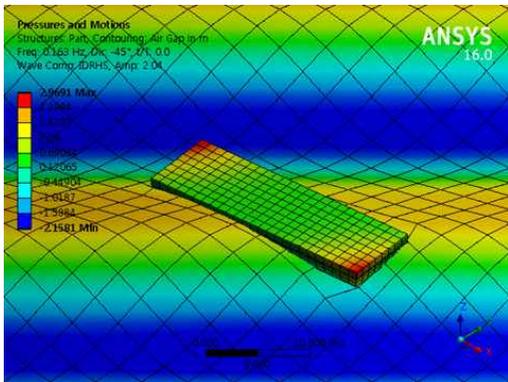
한국해양 연구원(2005)의 전해역 심해설계과 추정보고서Ⅱ에서 대상구조물이 설치된 해역 부근의 설계과 제원을 이용하여 Table 14와 같이 방위 및 재현주기에 따른 파랑 데이터를 작성할 수 있었다. 대상구조물의 설치해역에서는 방파제 및 육지의 영향으로 남서향(SW)과 서향(W)의 파랑만이 대상구조물에 작용하는 것으로 판단되어 구조해석 수행 시 두 방향에 대해서 재현주기별 파랑을 입력하여 구조물의 응력분포를 분석하였다.

Table 14 Wave data according to the return period (unit : m)

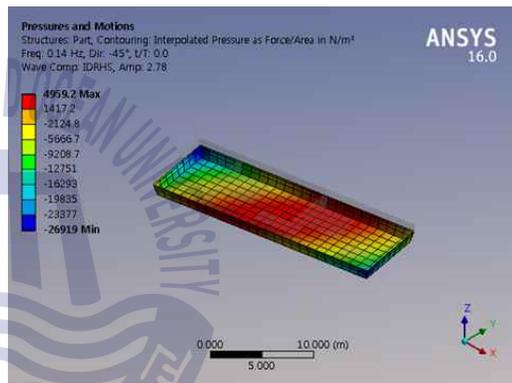
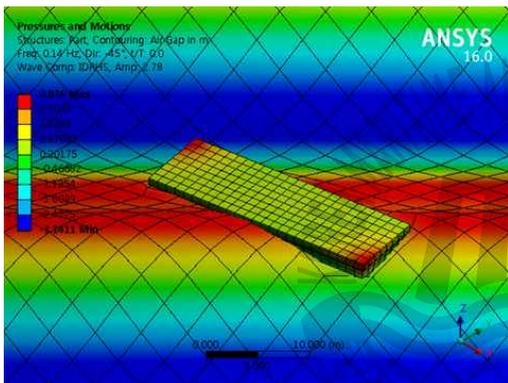
Period(year) Direction	1	2	3	5	10	20	30	50	100
N	0.75	0.87	0.93	1.01	1.10	1.19	1.24	1.30	1.38
NNE	1.15	1.37	1.48	1.59	1.72	1.84	1.91	1.53	2.08
NE	1.27	1.46	1.54	1.62	1.72	1.81	1.86	1.92	1.99
ENE	2.07	2.43	2.59	2.77	2.97	3.14	3.24	3.35	3.49
E	2.18	2.64	2.91	3.23	3.67	4.09	4.33	4.64	5.05
ESE	4.43	5.47	6.00	6.63	7.41	8.13	8.55	9.06	9.71
SE	6.34	7.66	8.33	9.06	10	10.83	11.29	11.84	12.57
SSE	5.38	6.54	7.16	7.89	8.82	9.69	10.19	10.81	11.60
S	3.45	4.10	4.42	4.79	5.24	5.65	5.88	6.16	6.52
SSW	2.22	2.67	2.91	3.18	3.51	3.84	4.01	4.22	4.50
SW	2.04	2.37	2.56	2.78	3.08	3.36	3.53	3.73	4.01
WSW	12.38	1.61	1.73	1.86	2.02	2.17	2.25	2.34	2.46
W	0.78	0.94	1.03	1.15	1.31	1.47	1.56	1.68	1.84
WNW	0.97	1.13	1.19	1.26	1.35	1.42	1.46	1.50	1.55
NW	1.15	1.24	1.29	1.33	1.38	1.42	1.45	1.47	1.50
NNW	0.93	1.00	1.03	1.06	1.09	1.12	1.14	1.16	1.18

Fig. 36 ~ 37은 수치해석 프로그램에서 재현주기 1, 5, 30년의 파랑의 입력에 따른 파형 및 구조물에 작용하는 압력 분포이며, 구조해석 모델에 파압 매핑을 통하여 각 재현주기별 파랑에 의한 응력분포를 구하였다.

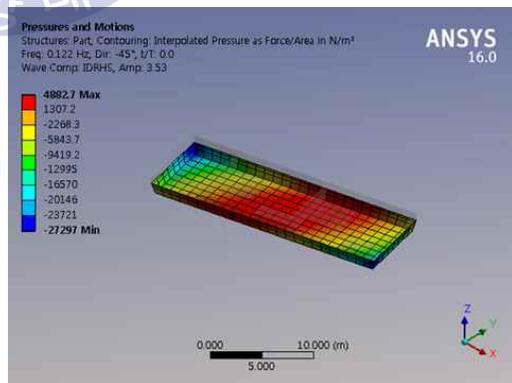
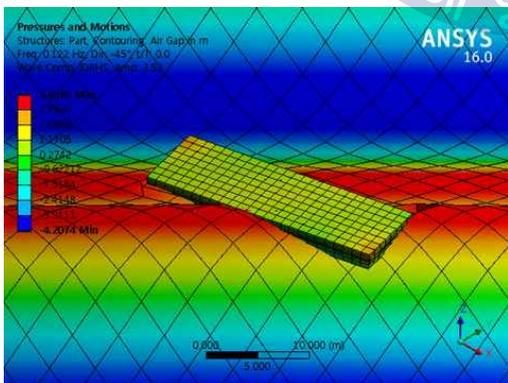
Fig. 38 ~ 43 은 재현주기 1, 5, 30년의 파랑에 의해 구조물에 발생하는 응력 분포 결과이며, 부유식 구조물은 상부슬래브, 하부슬래브, 보 및 기둥으로 나누어 결과를 산출하였다.



(a) Wave and pressure distribution with 1 year return period

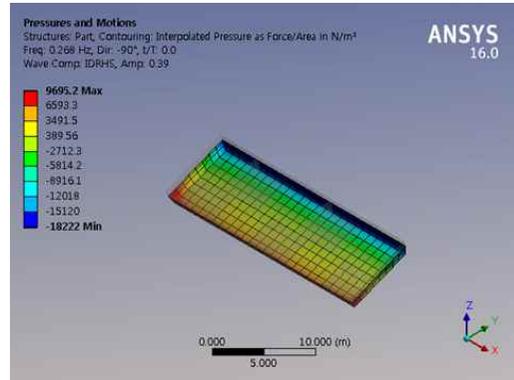
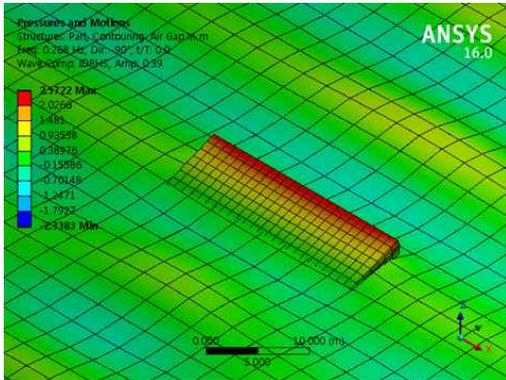


(b) Wave and pressure distribution with 5 year return period

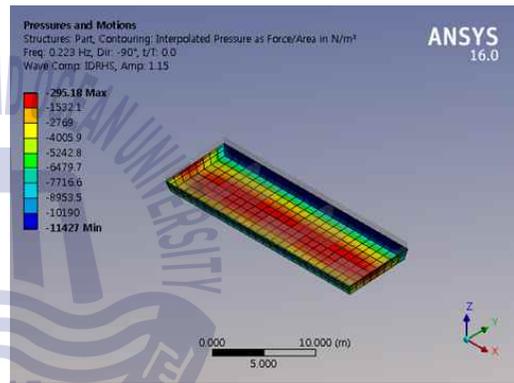
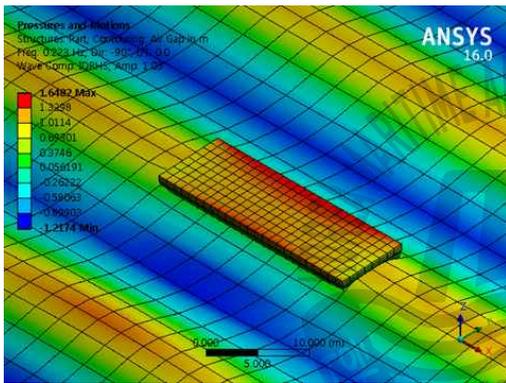


(c) Wave and pressure distribution with 30 year return period

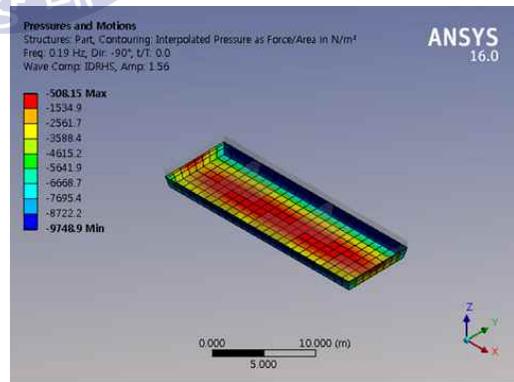
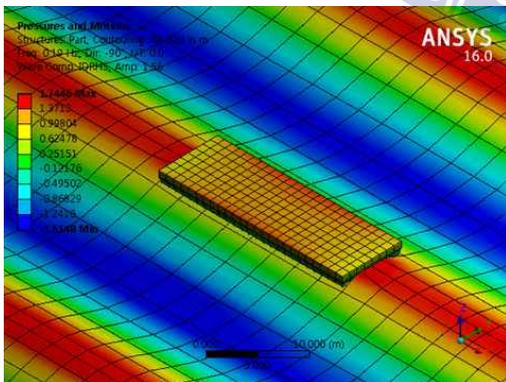
Fig. 36 Pressure distribution according to southwest wave



(a) Wave and pressure distribution with 1 year return period

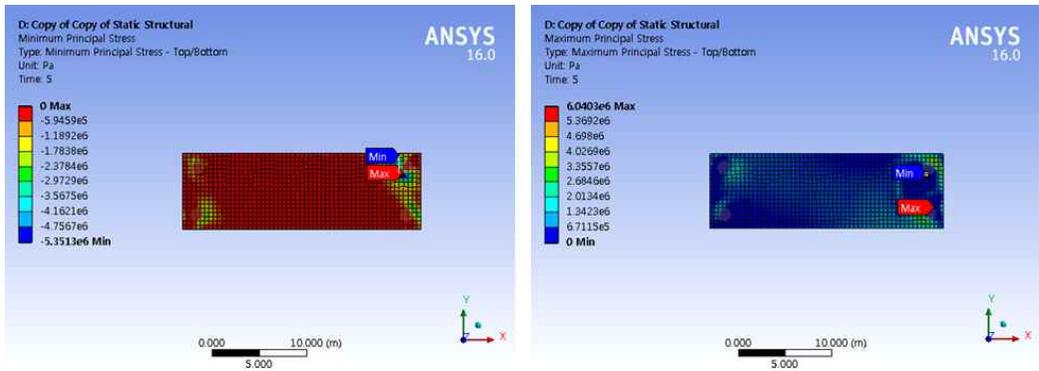


(b) Wave and pressure distribution with 5 year return period

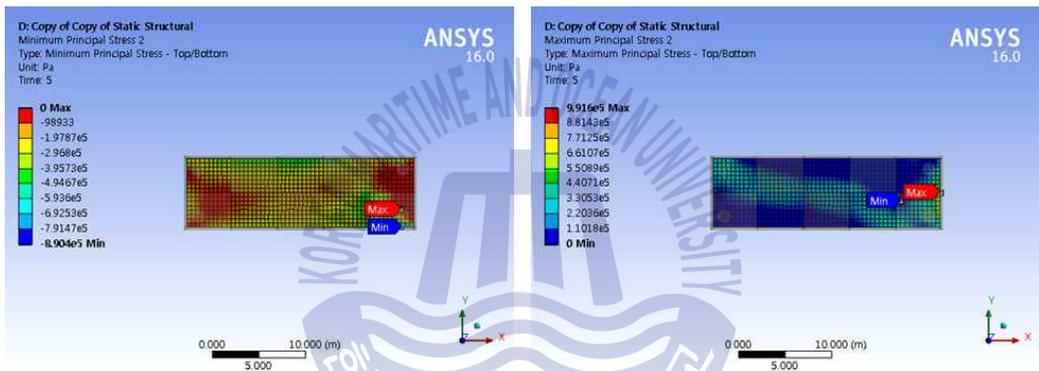


(c) Wave and pressure distribution with 30 year return period

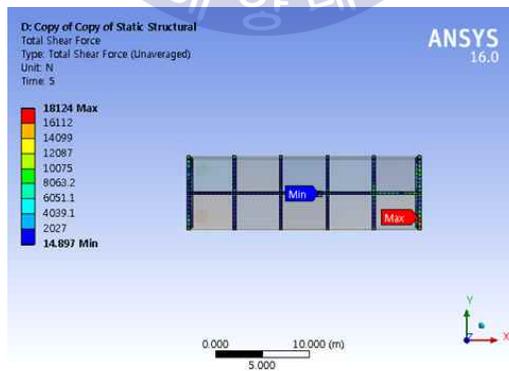
Fig. 37 Pressure distribution according to west wave



(a) Stress distribution of top slab

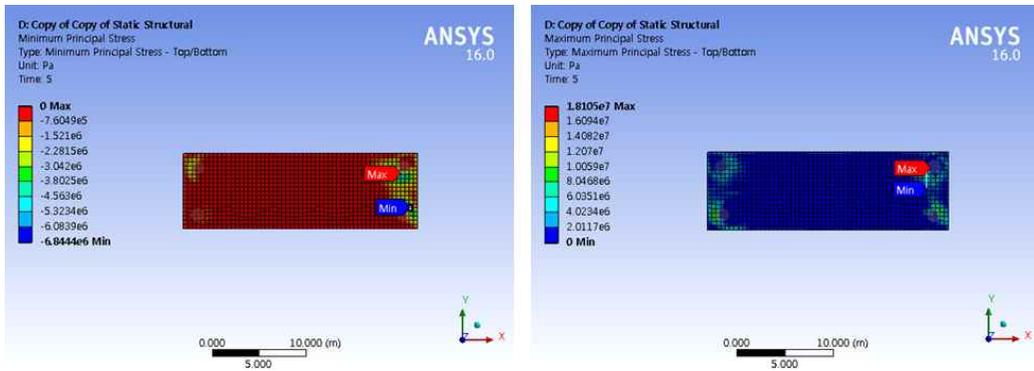


(b) Stress distribution of bottom slab

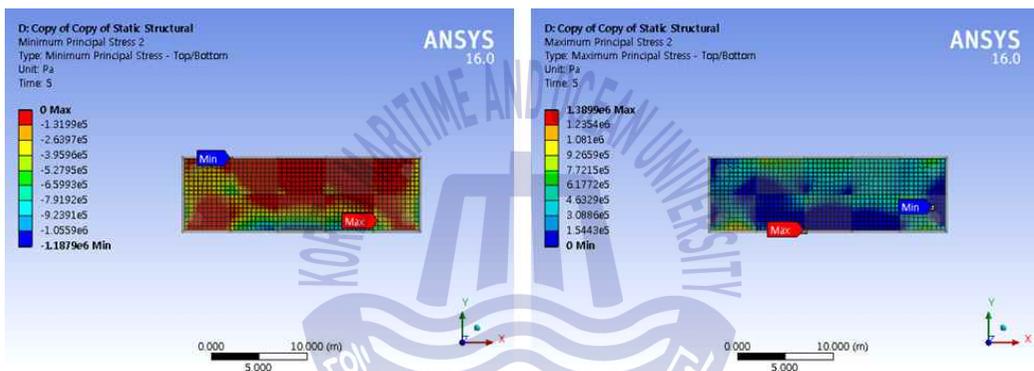


(c) Shear force distribution of beam and column

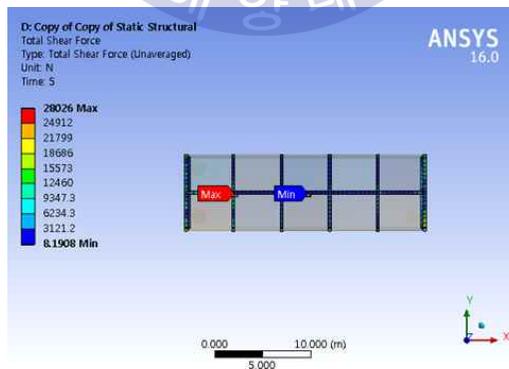
Fig. 38 Stress distribution according to southwest wave with 1 year return period



(a) Stress distribution of top slab

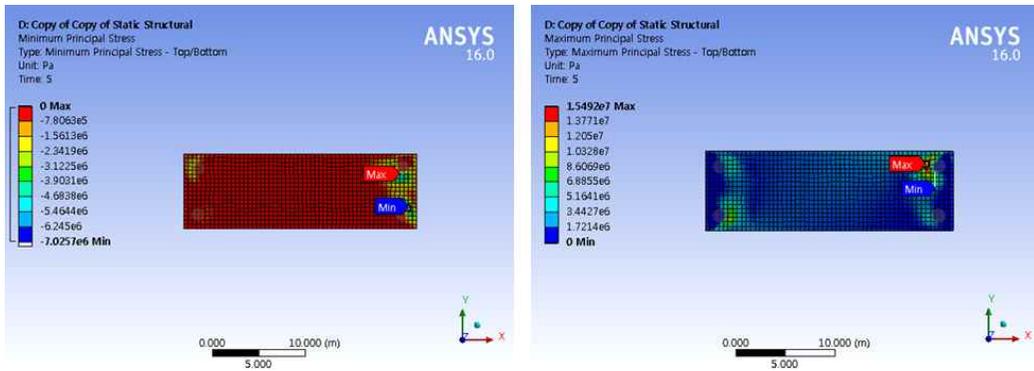


(b) Stress distribution of bottom slab

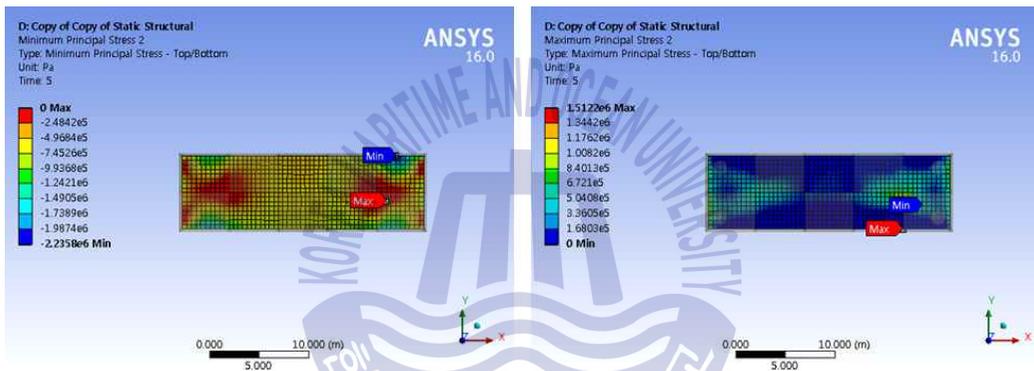


(c) Shear force distribution of beam and column

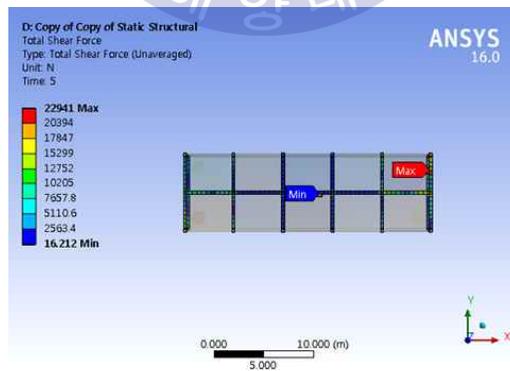
Fig. 39 Stress distribution according to southwest wave with 5 year return period



(a) Stress distribution of top slab

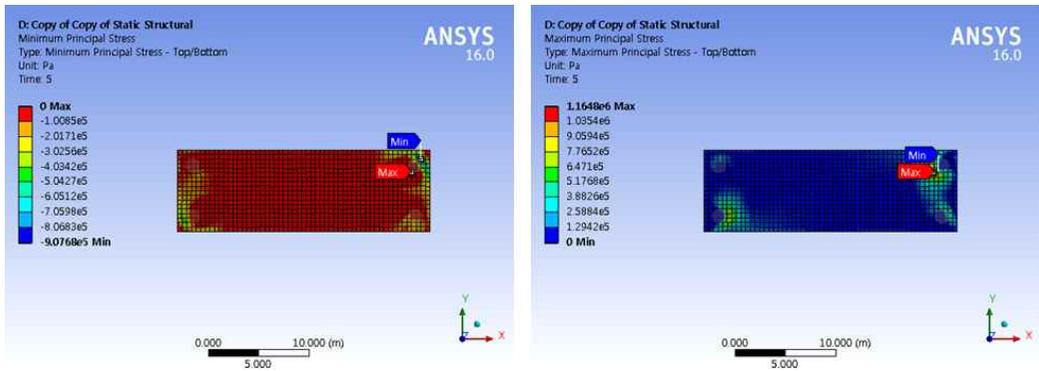


(b) Stress distribution of bottom slab

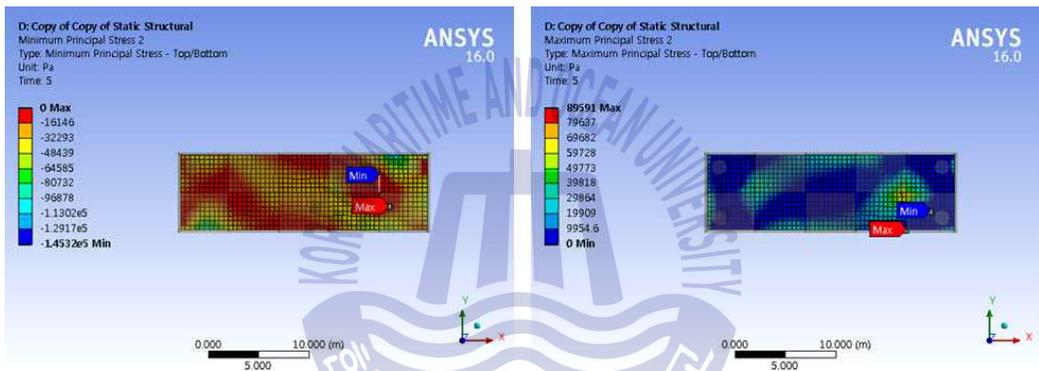


(c) Shear force distribution of beam and column

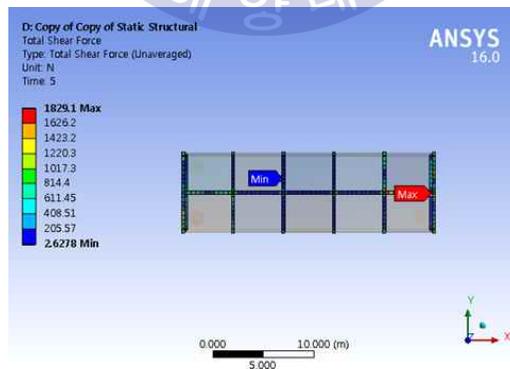
Fig. 40 Stress distribution according to southwest wave with 30 year return period



(a) Stress distribution of top slab

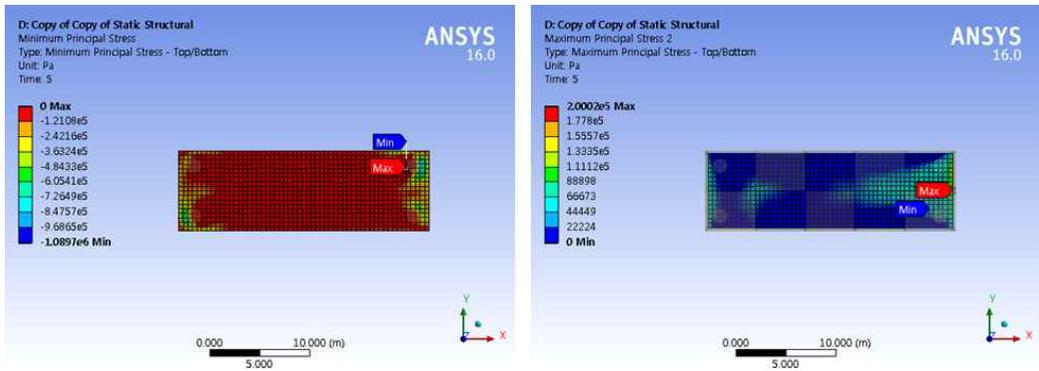


(b) Stress distribution of bottom slab

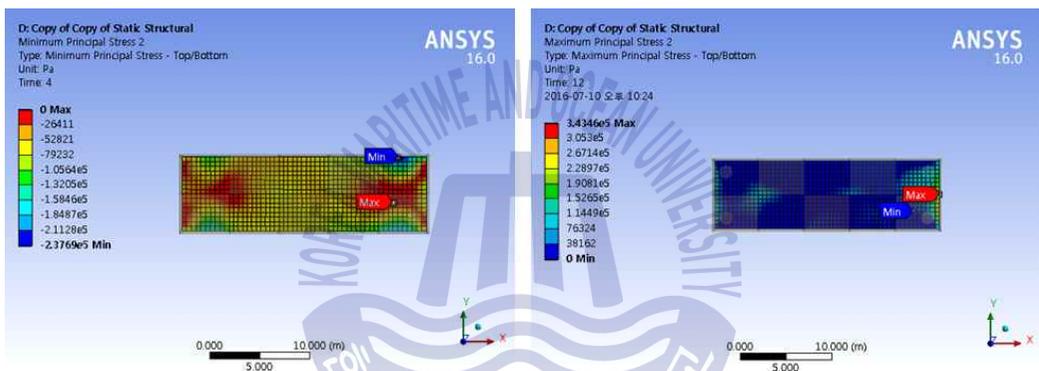


(c) Shear force distribution of beam and column

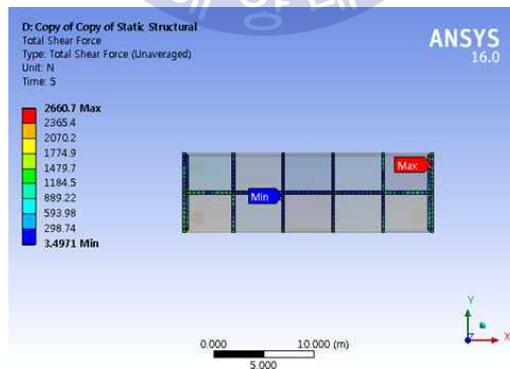
Fig. 41 Stress distribution according to west wave with 1 year return period



(a) Stress distribution of top slab

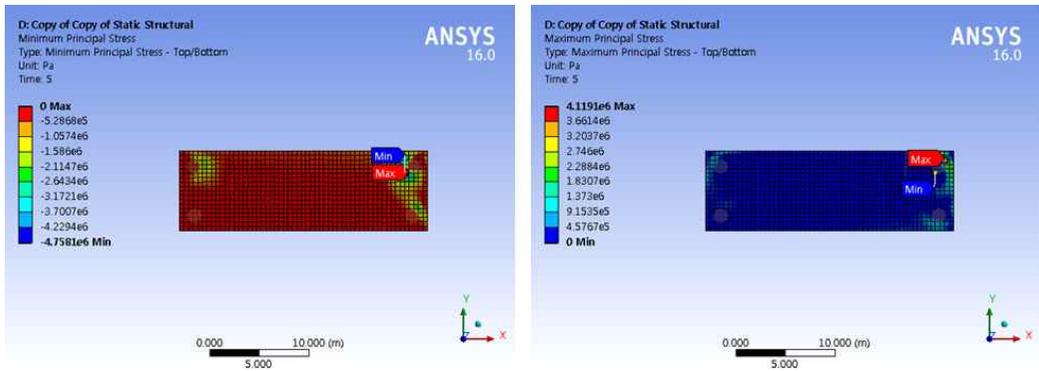


(b) Stress distribution of bottom slab

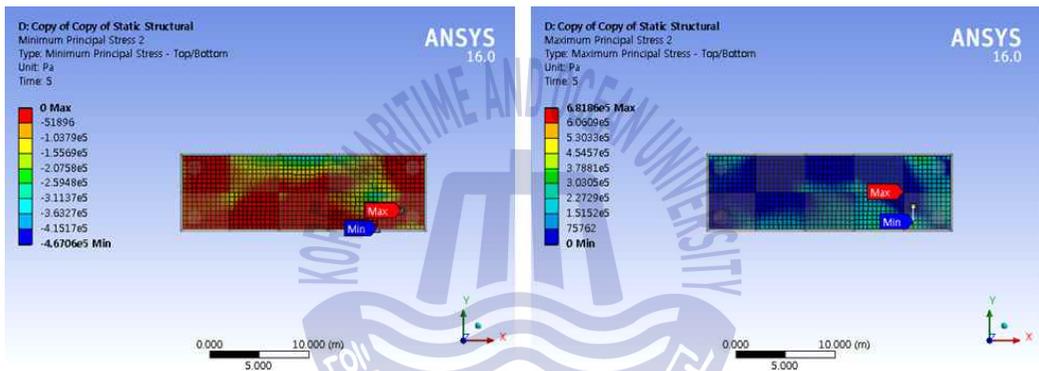


(c) Shear force distribution of beam and column

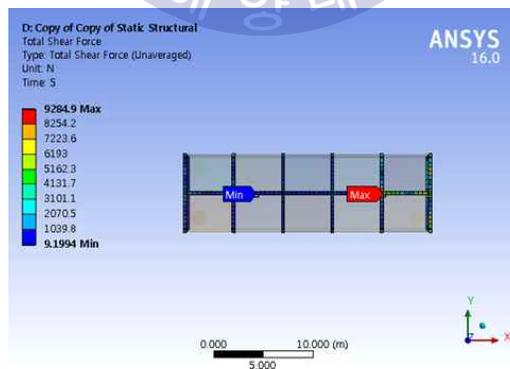
Fig. 42 Stress distribution according to west wave with 5 year return period



(a) Stress distribution of top slab



(b) Stress distribution of bottom slab



(c) Shear force distribution of beam and column

Fig. 43 Stress distribution according to west wave with 30 year return period

Table 15는 수치해석 수행 결과로 파랑의 방위 및 재현주기에 따라 상·하부 슬래브에서 발생한 최대압축응력, 최대인장응력과 보 및 기둥에서 발생한 전단력이다. 하부슬래브에 비해 상부슬래브에서의 응력이 큰 것으로 나타나며, 계류 체인에 의한 계류력의 작용으로 인한 것으로 판단된다.

Table 15 Maximum stress and shear force according to the wave

Direction	Return period	Compressive stress (Pa)		Tensile stress (Pa)		Shear force (N)
		Top slab	Bottom slab	Top slab	Bottom slab	Beam and column
SW	1	6.0403E+06	5.3513E+06	2.4105E+08	4.0108.E+07	1.8124E+04
	2	1.2436E+07	5.6764E+06	2.5569E+08	5.4725.E+07	2.1475E+04
	3	1.9285E+07	7.7034E+06	2.3889E+08	5.2374.E+07	2.3310E+04
	5	1.8105E+07	6.8444E+06	2.3173E+08	5.3509.E+07	2.8026E+04
	10	1.2001E+07	6.7419E+06	1.8657E+08	2.4915.E+07	2.0249E+04
	20	1.3808E+07	7.0927E+06	2.9246E+08	7.0757.E+07	2.2718E+04
	30	1.5492E+07	7.0257E+06	2.7143E+08	1.0071.E+08	2.2941E+04
	50	1.3220E+07	7.4237E+06	2.7584E+08	6.0239.E+07	2.5819E+04
	100	1.8372E+07	7.4951E+06	2.7906E+08	9.7770.E+07	3.3552E+04
W	1	1.1648E+06	9.0768E+05	4.0886E+07	6.5459.E+06	1.8291E+03
	2	4.0498E+06	4.9941E+06	2.2496E+08	2.1849.E+07	1.1136E+04
	3	6.3860E+05	5.4131E+05	2.4383E+07	5.3288.E+06	1.2823E+03
	5	1.3396E+06	1.0897E+06	4.9086E+07	1.0707.E+07	2.6607E+03
	10	6.3657E+06	7.1734E+06	1.4295E+08	2.9875.E+07	1.2220E+04
	20	1.0902E+07	9.5201E+06	2.4865E+08	1.6020.E+07	1.7184E+04
	30	4.1191E+06	4.7581E+06	2.1433E+08	2.1039.E+07	9.2849E+03
	50	7.1413E+06	8.1554E+06	3.2232E+08	3.8374.E+07	1.0334E+04
	100	8.1174E+06	6.6078E+06	2.9765E+08	3.9875.E+07	1.7006E+04

6.3 부유식 구조물의 피로해석

구조계 추정기법으로 추정된 콘크리트 강도와 피로해석 코드에 따라 압축응력, 인장응력, 전단력 S-N curve를 구하였으며, Fig. 44 ~ 46과 같다. 압축응력 S-N curve는 콘크리트의 강도가 감소함에 따라 최대 응력과 피로한계에 해당하는 응력 감소하였다. 또한 강도가 감소함에 따라 S-N curve의 기울기가 감소하는데, 이것은 구조물에 동일한 응력이 발생하더라도 구조물의 강도의 감소에 따라 더 낮은 반복 횟수에서 피로파괴가 발생하는 것을 나타낸다.

인장응력 S-N curve는 철근이 부식 등으로 강도 저하가 발생하지 않는 것으로 가정하고 구하였다. 전단력 S-N curve의 경우 압축응력 S-N curve와 마찬가지로 콘크리트 강도 저하에 의해 기울기 및 피로한도가 감소하였지만 감소폭이 비교적 작았다.

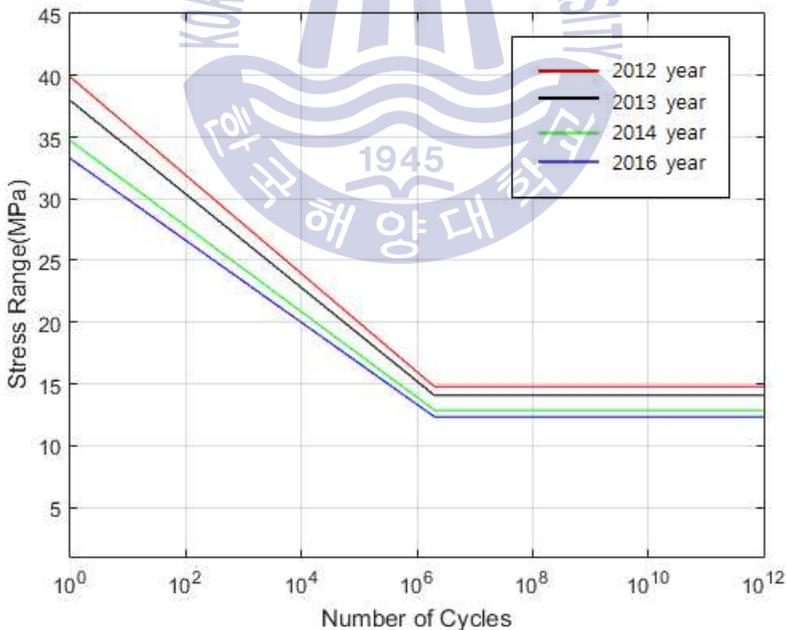


Fig. 44 Compressive stress S-N curve

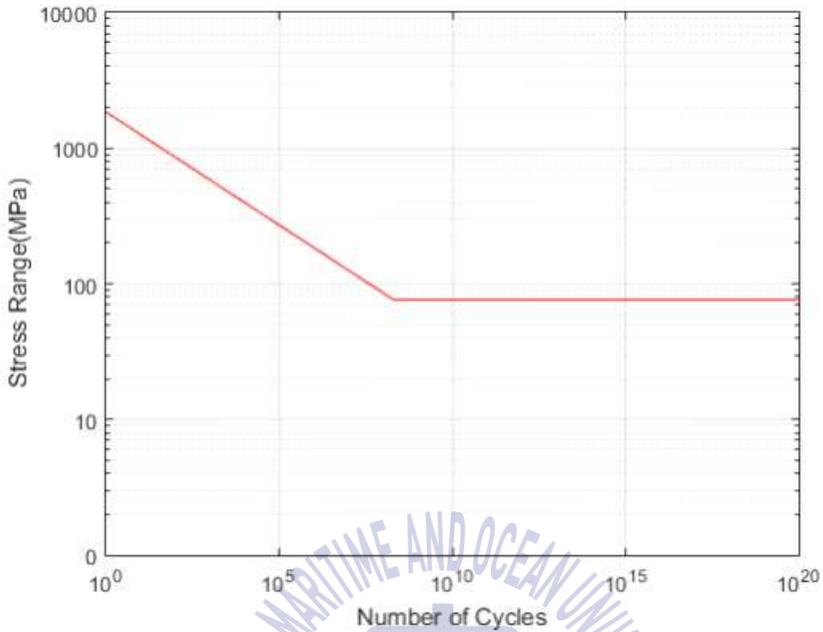


Fig. 45 Tensile stress S-N curve

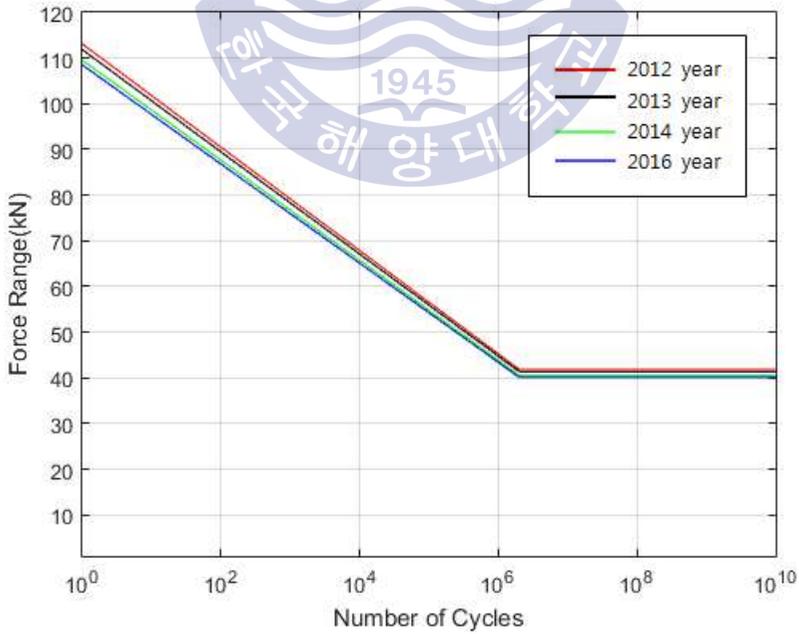
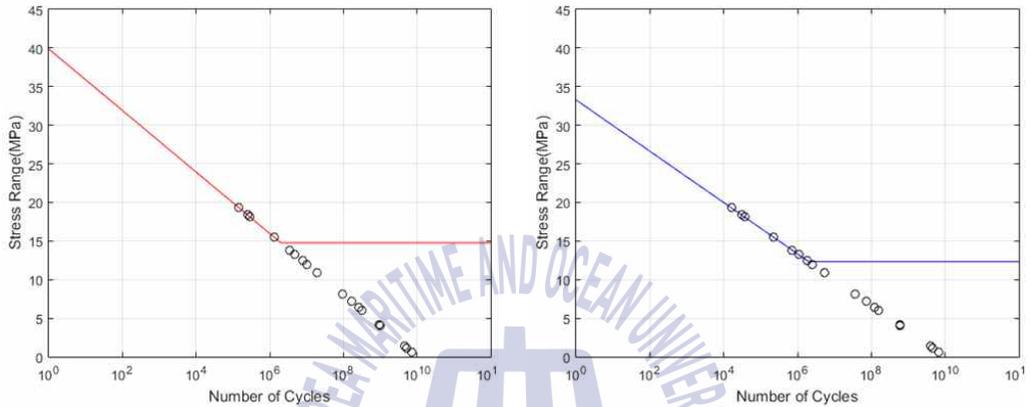


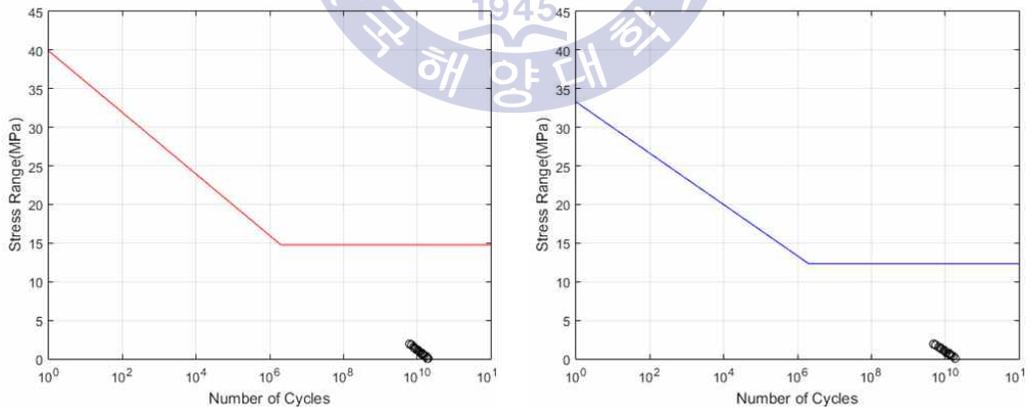
Fig. 46 Shear force S-N curve

Fig. 47 ~ 48은 압축응력에 대한 상부슬래브와 하부슬래브의 피로해석 결과이다. 콘크리트의 강도저하로 인해 피로한도가 감소하였으며, 상부슬래브의 경우 피로한도를 초과하는 응력이 3개에서 6개로 증가하였으며 피로수명은 1.5E+4 사이클 이상으로 산출되었다. 하부슬래브의 경우 응력값이 낮아 피로한도를 초과하는 경우가 발생하지 않았다.



(a) Apply elastic modulus in 2012 year (b) Apply elastic modulus in 2016 year

Fig. 47 Compressive stress fatigue life of top slab



(a) Apply elastic modulus in 2012 year (b) Apply elastic modulus in 2016 year

Fig. 48 Compressive stress fatigue life of bottom slab

인장응력에 대한 피로해석 결과는 Fig. 49와 같으며, 압축응력에 비해 피로한도를 초과하는 응력이 많이 발생했으나 피로수명이 $6.4E+4$ 사이클 이상의 값으로 압축응력에 대한 피로수명에 비하여 장수명을 나타내었다. 상부슬래브의 경우 대부분의 응력이 피로한도를 초과하였으며, 하부슬래브의 경우 남서향의 30년, 100년 주기의 파랑에 의한 인장응력 값이 피로한도를 초과하였다.

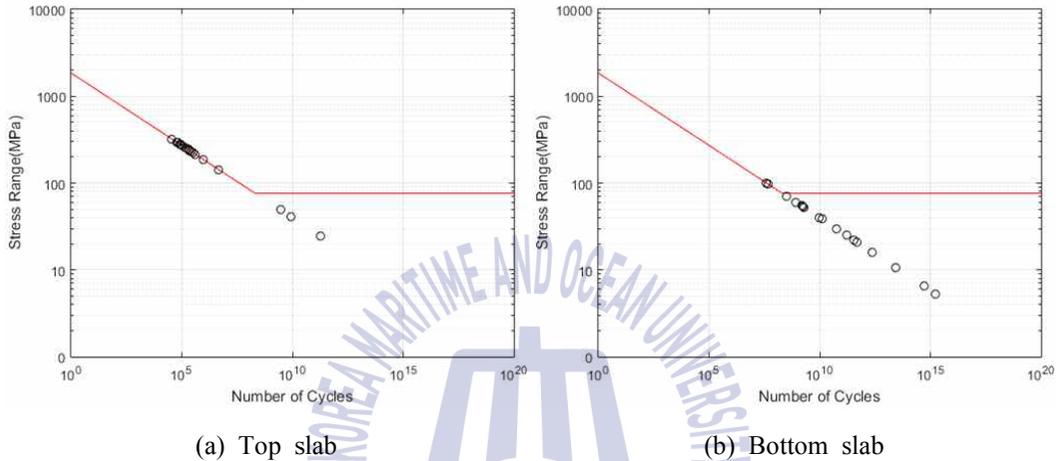


Fig. 49 Tensile stress fatigue life of slab

Fig. 50은 전단력에 대한 피로해석 결과이며 모든 값이 피로한도 이하에 위치하여 피로수명에 대한 영향이 없는 것으로 나타났다.

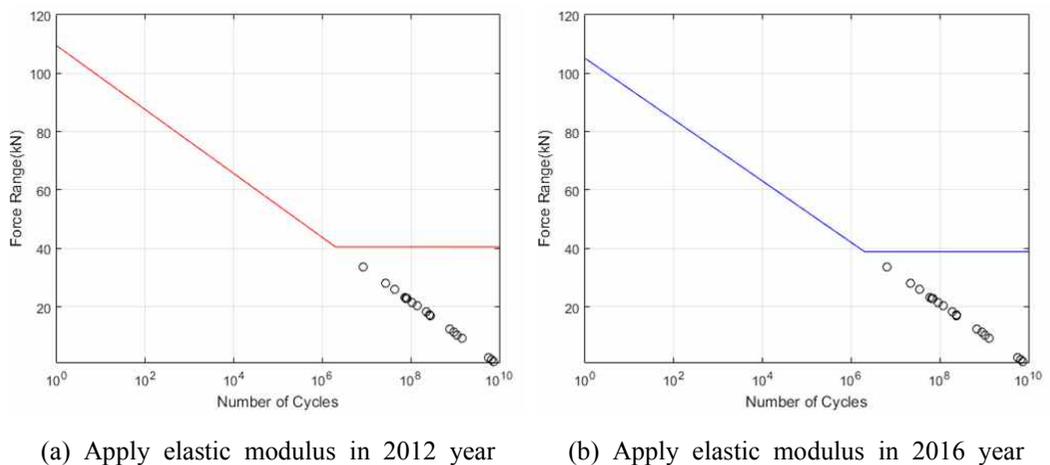


Fig. 50 Shear force fatigue life of beam and column

Table 16 Wave scatter diagram for the World Wide trade

TZ(s) Hs(m)	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	Sum
1.0	311	2734	6402	7132	5071	2711	1202	470	169	57	19	6	2	1		26287
2.0	20	764	4453	8841	9045	6020	3000	1225	435	140	42	12	3	1		34001
3.0		57	902	3474	5589	4973	3004	1377	518	169	50	14	4	1		20092
4.0		4	150	1007	2401	2881	2156	1154	485	171	53	15	4	1		10482
5.0			25	258	859	1338	1230	776	372	146	49	15	4	1		5073
6.0			4	63	277	540	597	440	240	105	39	13	4	1		2323
7.0			1	15	84	198	258	219	136	66	27	10	3	1		1018
8.0				4	25	69	103	99	69	37	17	6	2	1		432
9.0				1	7	23	39	42	32	19	9	4	1	1		178
10.0					2	7	14	16	14	9	5	2	1			70
11.0					1	2	5	6	6	4	2	1	1			28
12.0						1	2	2	2	2	1	1				11
13.0							1	1	1	1						4
14.0									1							1
Sum	331	3559	11937	20795	23321	18763	11611	5827	2489	926	313	99	29	9		100000

6.4 부유식 구조물의 잔존수명 예측

부유식 구조물의 잔존수명평가를 위하여 피로해석 결과 및 재현주기별 파랑 발생 빈도를 이용하여 잔존수명 평가를 수행하였다. Table 16은 노르웨이 선급 협회에서 제공하는 전해역 파랑 데이터(DNV,2007)로 각 재현주기 파랑의 파고, 주기에 따라 발생 빈도를 구하고 누적손상법에 적용하였다.

손상임계 값은 0.5로 설정하여 누적손상법에 의한 잔존수명 평가를 수행하였으며, 산출된 잔존수명은 Table 17과 같다. 압축응력에 의한 잔존수명은 콘크리트의 강도 저하에 의해 감소되었으며, 2016년도 물성치를 적용하여 산출한 부유식 구조물의 잔존수명은 50년이다. 인장응력에 의한 잔존수명은 66년으로 압축응력에 의한 잔존수명보다 높게 산출되었다.

따라서 대상구조물의 잔존수명은 50년으로 판단할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 콘크리트의 중성화 및 염해, 철근의 부식에 의한 강도 저하를 고려하지 않고 피로에 의해 잔존수명을 평가하였기 때문에 균열 및 피복 박리에 의해 콘크리트의 내구성이 저하될 경우 잔존수명은 더욱 감소할 것으로 사료된다.

Table 17 Residual Life assessment of floating structure

Member	Compressive		Tensile
	2012 year	2016 year	
Top slab	496	50	66
Bottom slab	-	-	2.58E+05

제 7 장 결론

본 논문에서는 부유식 구조물의 건전성 평가를 위하여 동적 특성을 이용하여 손상탐지기법과 구조계 추정기법을 적용하였으며, 잔존수명 평가를 위하여 파랑하중에 대한 피로해석을 수행하고 누적손상법을 적용하였다. 주기적 계측을 통해 구조물에 발생한 균열과 손상탐지 결과를 비교하였으며, 구조계 추정기법을 통해 계측 시점의 유효물성치를 추정하고 사용연수에 따른 강성저하 추이를 분석하였다. 또한 부유식 구조물의 설치 해역의 파랑하중에 의한 동적응답으로부터 각 부재의 피로해석을 수행하고 누적손상법 및 구조계 추정기법을 통해 추정된 유효물성치를 이용하여 잔존수명을 산정하였다.

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 모달 변형에너지를 이용한 플레이트 손상탐지 기법을 통해 부유식 구조물 상부 슬래브에 발생한 손상의 위치를 검출할 수 있었으며, 손상 개소가 증가하였을 때에도 기존의 손상과 추가적으로 발생한 손상을 모두 검출할 수 있었다. 또한 균열도와 비교를 통해 부유식 구조물에 대한 손상탐지 기법의 적용성 및 신뢰성을 검증하였다.

2. 2011년, 2013년, 2016년의 동적 데이터를 이용하여 손상탐지 기법을 수행하였을 때, 2013년 관측한 균열이 진전되어 기존 손상의 우측 하부에 새로운 손상이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이로써 다수의 계측 시점의 동적 데이터를 이용한 손상의 진전 양상 분석에 대한 손상탐지 기법의 유효성을 입증하였다.

3. 구조계 추정기법 적용을 통하여 부유식 구조물의 강성 감소 추이를 분석할 수 있었다. 2012년에서 2014년까지는 비교적 감소폭이 크게 나타났으나, 2014년부터 2016년까지는 감소폭이 0.23%로 강성이 유지되는 것으로 판단할 수 있었으며, 최종적으로 추정된 강성의 콘크리트 강도는 47.33MPa로 설계 강도 35MPa 이상의 값이기 때문에 대상 부유식 구조물의 구조 건전성이 확보된 것으로 판단된다.

4. DNV-code에 의해 압축응력, 인장응력, 전단력 S-N curve를 작성하였으며, 부유식 구조물 설치해역의 파랑 데이터를 이용하여 파랑의 방위 및 재현주기에 따른 응력분포를 구하고 대상 구조물을 상부 슬래브, 하부슬래브, 보 및 기둥으로 나누어 피로손상을 산정하였다.

5. 구조계 추정기법을 통해 추정된 계측 시점의 강성과 파랑에 대한 구조부재의 피로해석 결과를 누적손상법에 적용하여 대상 구조물의 잔존수명을 산정하였다. 파랑하중에 의한 응력은 계류력의 작용에 의해 상부 슬래브에서 크게 나타났으며, 다른 부재에서 발생한 응력은 피로한도 이하의 값으로 잔존수명에 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 상부슬래브의 압축응력에 대한 잔존수명은 50년, 인장응력에 대한 잔존수명은 66년으로 대상 부유식 구조물의 잔존수명은 50년으로 평가하였다.

6. 본 연구는 비교적 단순한 구조의 부유식 구조물의 구조 건전성 및 잔여수명을 평가하였으며, 추후 다양한 구조형식의 해양구조물에 대한 적용을 위해 추가연구가 필요하다.

참고문헌

- 김민중, 2011. *염해 및 피로신뢰성을 고려한 해양콘크리트 구조물의 VE/LCC 분석*. 박사학위논문, 전남대학교.
- 김민진, 2012. *콘크리트 부유식 구조물 합체의 건전성평가*. 석사학위논문, 한국해양대학교.
- 김준배, 2013. *Floating Dock의 안벽 임시계류 시스템에 대한 연구*. 석사학위논문, 울산대학교.
- 박수용, 2003. *손상평가와 구조물 신뢰성과의 연계*. 한국강구조학회 논문집, 15(1), pp.6-12.
- 박수용, 최상현, 윤성원, 정광량, 2004. *모드 유연성의 변화를 이용한 바닥구조의 손상탐지*. 대한건축학회 논문집, 20(5), pp.35-42.
- 박순목, 2012. *동파력을 고려한 콘크리트 유공케이슨의 피로 안전성 해석*. 석사학위논문, 창원대학교.
- 박영희, 2008. *초대형 콘크리트 부유식 구조물의 설계 및 해석에 관한 연구*. 석사학위논문, 세종대학교.
- 안진희, 2010. *플로팅 건축 개념을 도입한 생태문화센터 계획*. 석사학위논문, 홍익대학교.
- 오변관 등, 2014. *변형 유전 알고리즘을 이용한 건물 철골 보 구조물의 시스템 식별에 관한 해석적 연구*. 한국전산구조공학회 논문집, 27(4), pp. 231-238.
- 이두한, 2000. *랜덤하중을 받는 부재의 피로수명 평가를 위한 컴퓨터 프로그램 개발*. 석사학위논문, 창원대학교.
- 이두호, 정연주, 2011. *AQWA-ANSYS 연계에 의한 대형 부유구조체의 파랑운동-구조거동 통합해석*. 한국전산구조공학회 논문집, 24(6), pp.601-608.

- 정현, 2005. *해양 부유식 구조물을 사용한 친환경적 해상마리나 시설의 설계 및 시공기술 개발*. 오션스페이스.
- 한국건설기술연구원, 2014. *하이브리드 부유구조체 구조시스템 기술 개발*. 한국 건설기술연구원.
- 한국기계연구원, 1998. *부유구조물 구조·용접 기술 개발 : 해양공간이용 대형 복합플랜트 개발*. 한국기계연구원.
- 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, 2008. *초대형 부유식 해상구조물 기술개발*. 한국해양연구원 해양시스템안전연구소.
- 해양수산부, 2014. *항만 및 어항 설계기준 해설*. 해양수산부.
- 홍사영, 2007. *초대형 부유식 해상구조물 설계 매뉴얼*. 해양수산개발원.
- 한국해양연구원, 2005. *전해역 심해설계과 추정 보고서 II*. 해양수산부.
- American Concrete Institute, 1978. *Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Structure - ACI 357R-78*. American Concrete Institute.
- Ansys, 2010. *ANSYS AQWA User's Manual*, ANSYS Inc.
- Avitabile, P., 2001. *Experimental modal analysis*. *Sound and vibration*, 35(1), pp.20-31.
- Batel, M., Gade, S., Møller, N., & Herlufsen, H., 2003. *Ambient Response Modal Analysis on a plate structure*. In International Modal Analysis Conference .
- Choi, S. & Stubbs, N., 1997. *Nondestructive damage detection algorithms for 2D plates*. International Society for Optics and Photonics, Smart Structures and Materials' 97, pp.193-204.
- Craven, J.P., 1987. *Technology Milestones in Ocean Space Utilization*. OCEANS' 87, pp. 730-736.
- Det Norsk Veritas, 1977. *Rules for the Design, Construction and Inspection of the Offshore Structures*. Det Norsk Veritas, Norway.

- Det Norsk Veritas, 2007. *Environmental Conditions and Environmental Loads – DNV RP-C205*. Det Norsk Veritas, Norway.
- Det Norsk Veritas, 2012. *Offshore Concrete Structures – DNV OS-C502*. Det Norsk Veritas, Norway.
- Christou, M. & Konstantinidou, M., 2012. *Safety of offshore oil and gas operations : Lessons from past accident analysis : Ensuring EU hydrocarbon supply through better control of major hazards*. Publication JRC77767. Joint Research Centre, European Commission.
- Gibson, J.D. & Melsa, J.L., 1976. *Introduction to Nonparametric Detection with Applications*. Academic press.
- Hillyard, M.J., 2005. *The Atlantis Garrison: A Comprehensive, Cost Effective Cargo and Port Security Strategy*. Strategic Insights, Vol. 6, issue 4.
- ME' scope TM, 2009. *Version 5.0 Operating Manual*. Vibrant Technology Inc.
- Miner, M.A., 1945. *Cumulative damage in fatigue*. Journal of Applied Mechanics, 12(3), pp. 159-164.
- Sachithanathamoorthy, K., 2012. *Deign and Analysis of Tension Leg Anchor Systems for Floating Windmills*. M.Sc. Norwegian University of Science and Technology.
- Stubbs, N., & Osegueda, R. 1990. *Global non-destructive damage evaluation in solids*, International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol. 5, No. 2, pp.67-79.
- Terai, K., 1985. Ocean Communications City. In: Kato W., et al., *Ocean space utilization '85 : proceedings of the international symposium*, Nihon University, Tokyo, Japan, June 1985.
- Ostachowicz, Wieslaw & Alfredo Güemes, 2013. *New trends in structural health monitoring*, Springer Science & Business Media.