

해양 플랜트 라이저의 모션 모니터링 기술과 이를 이용한 내력 및 피로수명 평가 원천 기술 개발

2017. 04.30

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 고려대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "해양 플랜트 라이저의 모션 모니터링 기술과 이를 이용한 내력 및 피로수명 평가 원천 기술 개발에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2017 . 4 . 30

주관연구기관명 : 고려대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 최 준 호

연구 원 : 이 정 화

보고서 요약서

과제고유번호	15CTAP-C078861-02	해 당 단 계 연 구 기 간	2014.08.14.- 2017.04.30	단 계 구 분	(1)/ (1)
연 구 사 업 명	국토교통기술촉진연구사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	해양 플랜트 라이저의 모션 모니터링 기술과 이를 이용한 내력 및 피로수명 평가 원천 기술 개발			
	단위과제명				
연 구 책 임 자	최 준 호	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 2 명 내부 : 2 명 외부 : 명	총연구비	정부:100,000 천원 계:100,000천 원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	고려대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약				보고서면수	73 page
라이저(Riser)는 해저 자원을 시추하기 위한 파이프로 해저면의 시추구와 해수면의 플랫폼을 연결하는 구조물이다. 라이저는 단순한 파이프이지만 거동 해석이 어려울 뿐 아니라 손상이 발생했을 경우 막대한 사회적, 경제적 손실이 발생한다. 이러한 라이저의 건전도 모니터링을 위해서 구조물 건전도 모니터링 기술(SHM)을 활용 할 수 있다. 하지만 라이저는 수중이라는 환경적 제약으로 인해 기존 모니터링 기술의 한계를 극복할 수 있는 새로운 기술이 필요하다. 이에 본 연구에서는 라이저 3차원 구조해석을 통해 라이저의 모션 데이터를 구축하였다. 그리고 본 연구만의 독자적인 모션 모니터링 기술을 개발하고 이를 통해 라이저의 내력 및 피로 수명을 예측할 수 있는 기술을 완성 하였다.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	해양플랜트, 라이저, 가속도, 구조물 건전도 모니터링, 각속도			
	영 어	Offshore Structure, Riser, Acceleration, Structural Monitoring, Angular Velocity			

Summary

I . Title

Development of Stress and Fatigue Evaluation using Motion Monitoring of Flexible Riser

II . Research Objectives and Necessity

Risers which are connected with seabed and platform are one of the most important subsea structure in producing oil and gas. However, these risers could be damaged by many factors including corruptions or extreme offshore loading conditions. Such damage is directly related to an environmental and an economic loss, therefore ensuring the reliability of riser is important. Generally, risers are slender steel pipes with some of which have a length longer than 5,000meters. For riser monitoring, sensors which can measure the underwater system must be used. Therefore, specialized technique is necessary. In this respect, Structural Health Monitoring (SHM) technique is widely applied in bridge structures to ensure the reliability of risers. There are many fields of study related to SHM, but I am especially interested in the study of ensuring the reliability of risers by calculating the internal forces and fatigue life.

The objective of this research are (1) coupled dynamic analysis of hull/riser/mooring (2) to develop the riser motion monitoring technique using three dimensional acceleration and angular velocity, (3) establishment of model updating method for riser and (4) to evaluate internal forces, fatigue life, and unusual behaviors of risers using riser motion.

목 차

제1장 연구개발과제 개요	1
제1절. 연구개발의 목적 및 필요성	1
제2절. 연구개발의 정의 및 특징	4
제3절. 관련분야의 국내외 기술개발 현황	7
 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과	11
제1절 연구수행 전략 및 방법론	11
제2절 연구수행 과정 및 결과	14
 제3장 최종 연구성과	52
제1절 라이저 3차원 거동 해석 기술	52
제2절 라이저 모션 모니터링 기술	54
제3절 라이저 해석적 모델 구축 기술	60
제4절 라이저 건전도 모니터링 기술	63
 제4장 연구목표 달성 및 효과	70
제1절 연구개발 최종목표 달성도	70
제2절 연구개발 성과의 효과분석	72
 제5장 연구성과의 활용 및 추가 연구 필요성	73
제1절 연구성과 향후 활용 방안	73
제2절 추가 연구 필요성	73

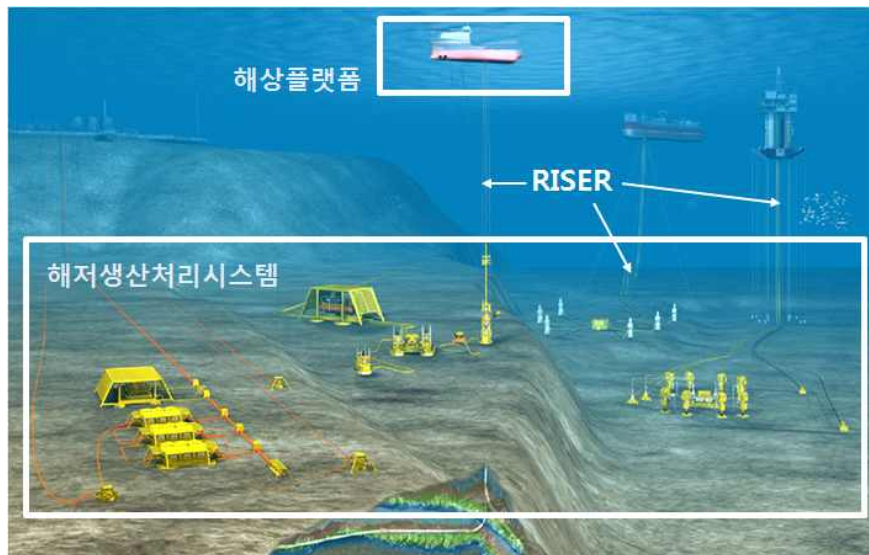
제1장 연구개발과제 개요

제1절 연구개발의 목적 및 필요성

가. 연구개발의 필요성

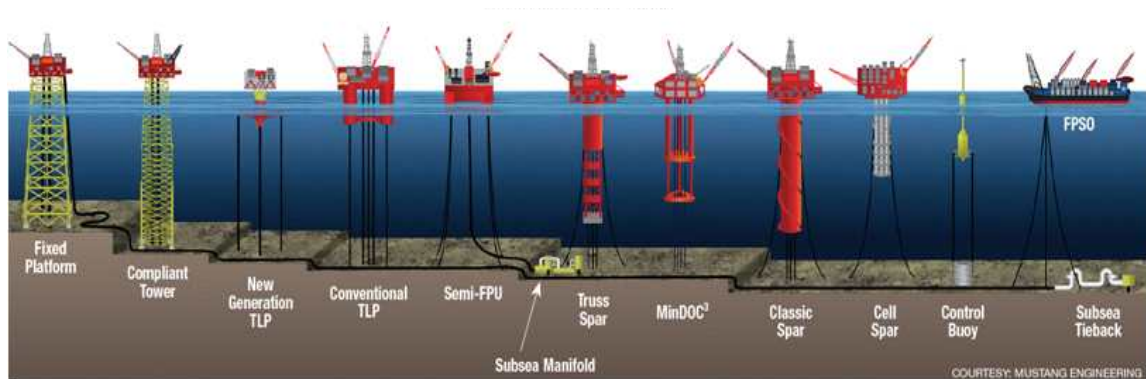
세계적으로 산업화, 도시화가 심각해지면서 사회기간 시설 확보를 위한 공간 자원의 고갈과 에너지 문제의 심각성이 대두되고 있으며, 이와 같은 문제의 해결 방안으로 해양의 이용과 개발에 관심이 집중되고 있다. 해양플랜트 산업은 해양의 이용과 개발에 관한 산업으로 자원 발굴, 시추, 생산에 필요한 장비를 건조하거나 설치, 공급하는 산업을 통칭 하며 시장 규모는 에너지 수요와 밀접한 관계가 있어 지속적으로 증가하고 있다.

해양 플랜트는 그림과 같이 해저 유정에서 원유 및 가스 등을 처리·생산하는 해저생산처리시스템 (Subsea Production and Processing System)과 생산된 원유와 가스를 해상플랫폼에 이송하는 URF(Umbilicals, Riser & Flowlines), 이송된 가스나 원유를 생산·저장하는 해상플랫폼으로 구성된다.



해양플랜트 구성(해상플랫폼, 해저생산처리시스템,URF등)

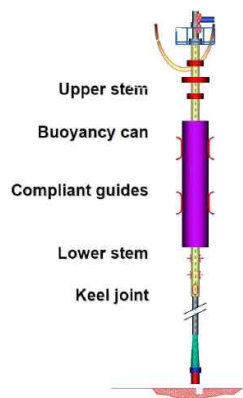
해상 플랫폼은 그림 1.2와 같이 해저면에 고정된 고정식 플랫폼(Fixed platform)과 해중에 뜬 상태의 부유식 플랫폼(Floating platform)형태로 구분 할 수 있다. 수심이 낮은 지역에서는 주유 고정식 플랫폼이 사용되며 수심이 깊은곳에서는 부유식 플랫폼이 주로 사용된다. 부유식 플랫폼의 종류에는 TLP, Spar, Semisubmersible, FPSO와 같은 형식들이 있다. 이중에서도 FPSO는 부유식 원유시추 저장 설비로 한 유전에서 생산을 끝낸 후 다른 유전으로 용이하게 이동 할 수 있어 매우 경제적으로 석유 및 가스를 생산 할 수 있는 시설이어서 제작이 점차 증가하고 있으며 고부가가치의 구조물이라고 할 수 있다.



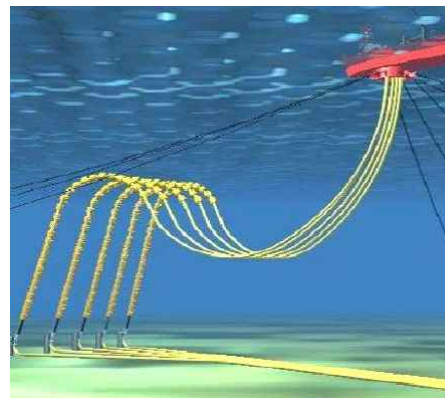
해상플랫폼 유형

앞서 설명하였듯 해양플랜트의 구성품 중에서 라이저(Riser)는 해양플랜트에 공통적으로 적용되는 핵심 설비로서 해저에서 생산된 석유나 가스를 수송하기 위해서 해저면에서 해상 구조물까지 연결되는 파이프(Pipe)를 지칭한다. 해양플랜트의 설치 수심과 유전까지의 거리에 따라 일부 라이저는 최대 길이 5,000m까지 설치되어 운영 중이며, 직경은 10cm정도에서부터 100cm이상까지, 두께도 1cm에서 4cm정도까지 다양하게 사용되고 있다.

라이저는 조류, 해류 등 험한 해양환경에 직접적으로 장시간 노출되어 부식, 자연 재해, 충격 등의 원인으로 인해서 파괴가 될 경우 심각한 환경파괴와 막대한 복구비용을 초래하며 해상플랫폼의 움직임에 따라 같이 움직이므로 매우 복잡한 거동을 나타내므로 라이저의 건전도를 확보하고 모니터링하는 일은 매우 중요하다고 할 수 있다.



a) 드릴링라이저

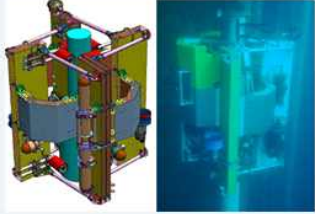
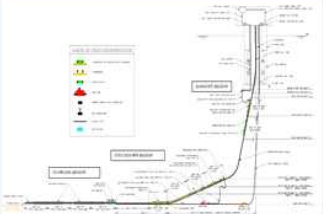


b) 유연라이저

라이저 유형

이러한 라이저의 건전성을 모니터링 하기 위해서 오늘날 대형 토목 구조물에 많이 사용되는 구조물 건전도 모니터링(SHM, Structural Health Monitoring)기술을 활용 할 수 있다. 구조물 건전도 모니터링기술은 구조물의 결함/손상 또는 현재의 상태를 탐지하고자 하는 목적으로 구조물의 거동을 계측하고 그 데이터를 처리하는 기술을 지칭하며 토목구조물을 대상

으로 많이 적용되고 있다. 하지만 라이저는 일반적인 토목 구조물과는 달리 직경에 비해서 매우 긴 세장한 구조(일부는 5,000m 이상인 것도 있음)이며, 수중에서 측정 가능한 센서를 이용하여야 하므로 현재 개발된 토목구조물의 건전도 모니터링 기술을 그대로 적용하는 것은 매우 어렵기 때문에 라이저 건전도 모니터링에 특화 된 기술 개발을 필요로 한다. 그래서 본 연구에서는 부유식 플랜트의 Subsea 설비 중 하나인 라이저의 건전도 모니터링 기술을 확보하여 기존 구조공학 기술, 토목 구조물 건전도 모니터링 기술과 융합된 해양플랜트 건전도 모니터링 원천 기술을 개발하고자 한다.

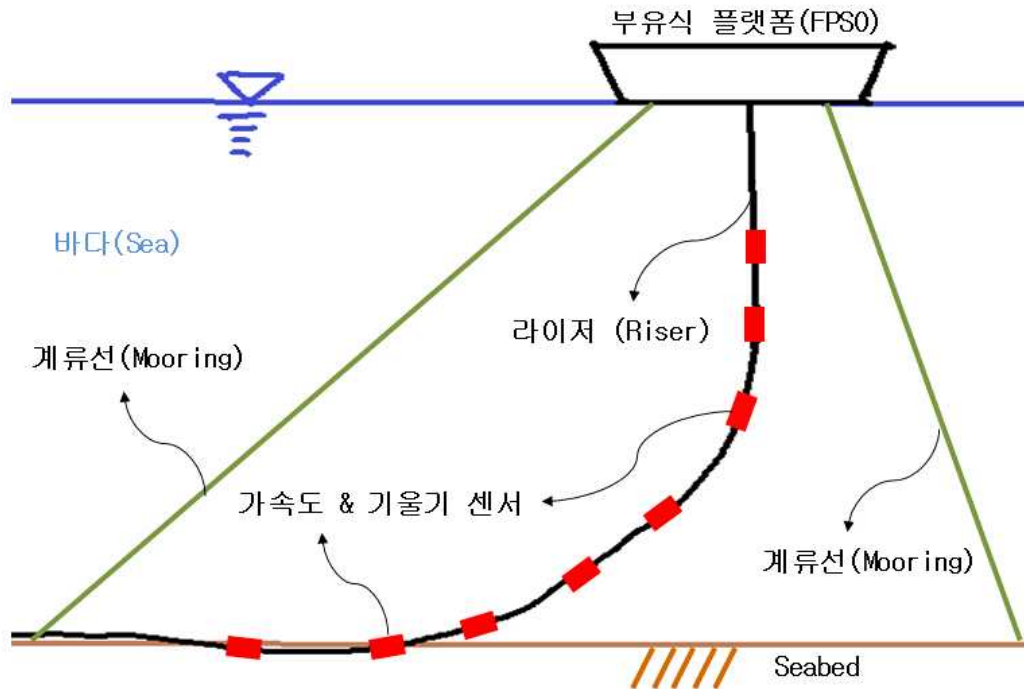
국부적 기법 (Local Method)	VS	전역적 기법 (Global Method)
Visual inspection Ultrasonic Radiography Electromagnetic Magnetic Flux Leakage	측정 방법 및 측정 항목	Strain 가속도
	측정 예시	
직관적으로 이상부위 확인 가능	장점	취약부위 예측 가능 장기거동 변화 예측가능
손상 및 피로 예측이 어려움	단점	센서 설치 문제와 수집된 데이터 처리기술의 부재
높음	현재 기술 활용도	시작 단계
현재 수준 유지	향후 발전 가능성	매우 높음

[그림 1.4] 국부적 기법과 전역적 기법 비교

나. 연구개발 목적

본 연구는 부유식 플랫폼(FPSO)용 라이저를 대상으로 운영 중인 라이저의 내력 및 피로 수명 예측을 위한 건전도 평가 기술 개발을 목적으로 하며, 모식도는 다음 그림과 같다.

연구 진행 방향을 개략적으로 설명하면 라이저에서 각 부분의 가속도와 경사변화량을 각각 가속도계와 기울기센서를 이용하여 측정하고 측정된 가속도와 기울기를 이용하여 라이저 모션(위치변화량)을 계산한다. 계산된 모션을 라이저 해석 모델(FE)에 입력하여 구조해석을 수행하여 시간 변화에 따른 라이저의 내력 변화량을 계산한다. 이를 통해 최종적으로 라이저의 피로수명을 예측하고자 한다.



[그림 1.3] 연구 방법 개요

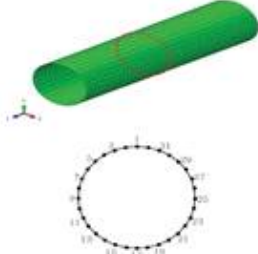
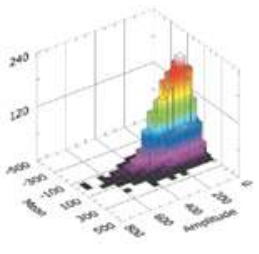
제2절 연구개발의 정의 및 특징

본 연구는 라이저의 건전도 모니터링 원천 기술 개발을 위해서 다음 표와 같은 세부 기술의 연구개발로 구성되어 있다. 각 기술의 정의 및 특징은 다음과 같다.

■ 핵심기술 1 : 플랫폼/계류선/라이저의 동적상호작용을 고려한 라이저 3차원 해석 기술 구축

- 라이저의 3차원 해석 기술은 해석 기술 확보와 라이저 거동 DB구축
 - 현재 우리나라의 해양 플랜트 설비 수주실적은 많지만 핵심 설계 기술은 아직 확보되지 않았을 뿐 아니라 발주사가 검증된 장비 및 기술을 요구하고 있어 기술에 대한 진입장벽이 높아 해외 기술에 대한 의존도가 높은 실정임
 - 국내에서는 해양 플랜트와 관련한 다양한 연구 개발이 진행 중이지만 주로 Topsides 장치 개발, 드릴링라이저, 해저 파이프라인 Laying 설계 기술에 집중되고 있어 FPSO용 라이저와 같은 복잡한 거동 해석 기술이 요구되는 기술에 대한 연구는 아직 진행되고 있지 않음
 - 본 연구에서는 라이저의 설계 및 해석기술을 확보하고자 함
- 최종목표의 성격: 라이저 거동 DB 구축
 - 현재 라이저의 설계 및 유지관리는 외국업체에 의해서 수행되고 있어 본 연구에서

연구 개발 상세 내용 및 최종 목표

기술명	3차원 해석 기술	모션 모니터링 기술	해석적 모델 구축 기술	건전도 평가 기술
				
세부 목표	플랫폼/계류선/라이저 동적상호작용 해석	3차원 가속도, 기울기를 이용한 라이저 모션해석	라이저 거동 정밀재현을 위한 해석 모델 구축	라이저 내력 및 피로 수명 평가 기술 개발
내용	-플랫폼에 작용하는 파랑하중, 해류, 조류하중 등 다양한 환경하중 고려 -플랫폼/계류선/라이저 동적상호작용 해석	-라이저의 3차원 가속도, 기울기만을 이용하여 수중에서 라이저 모션(움직임) 계산 알고리즘 개발 -측정 노이즈에 따른 모션 정밀도 분석	-동적 계측 데이터를 이용한 모델 업데이트 기법 검토 -라이저의 거동을 정밀히 재현 할 수 있는 라이저 해석적 모델 구축 -국부해석 모델 구축 방법 연구	-해석적 모델과 계산된 라이저 모션 데이터를 이용 -라이저의 내력해석, 피로검토, 이상상황 모니터링 시스템 구축 -취약 부위 산정 및 피로 수명 예측
최종 성과물	-라이저의 3차원 동적 거동 해석 기술(방법) 확보 -라이저의 3차원 거동 DB 구축	-가속도·기울기 데이터를 융합하여 시간에 따른 라이저 움직임 모니터링 알고리즘	-라이저 정밀 거동 해석을 위한 해석 모델 구축 방법	-라이저 건전도 모니터링 시스템 아키텍처 -취약 부위 산정 및 피로 수명 예측 기법



라이저 모션을 이용한 취약부위 산정 및 피로 수명 예측 기술 개발

- 개발하고자 하는 라이저 모션 해석 기술은 아직 우리나라에서 시도된 바 없음
- 현재 단계에서 라이저의 가속도, 각속도와 같은 실측데이터를 확보하는 것은 불가능한 상황임

- 본 연구는 아직 시도되지 않은 기술을 처음 도전적으로 수행하기 때문에 라이저의 형식 및 하중조건, 거동조건을 가정하고 이를 해석하여 해석적으로 확보된 가속도, 각속도를 계측 데이터로 가정하고 DB로 구축하여 검증 대상으로 연구를 진행하고자 함

■ 핵심기술 2 : 해양플랜트 라이저의 모션(위치) 모니터링 기술 개발

- 라이저의 모션 모니터링 기술은 기법 개발과 해석적 검증에 최종 목표가 있음
 - 일반적으로 토목구조물의 모션(거동 변위)을 측정하기 위해서는 현재 GNSS (Global Navigation Satellite System)(Im 외, 2011)과 레이저 변위계가 활용되고 있으나 수중 구조물에서는 적용이 불가능함
 - 수중 측정 기술로는 수중라이더가 있지만 레이저의 산란으로 인하여 라이더와 측정대상 간의 거리가 멀어 질수록 움직임의 측정이 불가능하다는 한계가 있음
 - 토목구조물의 거동 계측에 많이 활용되고 있는 기술 중 가속도를 이용한 변위 추정 기술(김승준 외, 2012)을 이용하면 수중 구조물의 모션을 추정 할 수 있음
 - 하지만, 가속도를 이용한 모션 추정기법은 외력변화에 매우 민감하여 시간이 지남에 따라 오차가 증가하고, 부유식 플랫폼은 6자유도 거동을 하기 때문에 가속도만으로 모션을 추정하는 것에 한계가 있음
 - 이러한 문제점들을 해결하고자 본 연구에서는 가속도, 각속도를 융합하여 활용한다는 점에서 기존의 연구들과의 차별성이 있음. 각속도 측정을 위해서는 주로 자이로스코프를 활용 할 수 있는데 자이로스코프 관련기술은 지속적으로 발달하고 있어 센서 크기 및 정밀도가 향상하고 있어 측정에 제약이 없음
 - 가속도와 각속도를 이용한 모션 측정 기술은 군사분야, 로봇기술 등에 적용되는 최신 기술(문흥기 등,2006)로 아직 구조물에서 이와 같은 기술은 전무한 실정이므로 라이저 거동 계측에 적합한 모션 측정 기법을 개발하고자 함

○ 최종목표의 성격: 해석적 검증

- 상기한 바와 같이 라이저의 가속도, 각속도 실측 데이터를 수집하는 것은 불가능하기 때문에 개발된 기법을 해석적으로 검증하고자 함
- 측정 노이즈에 따른 모션 추정 정밀도 분석을 위해서 다양한 노이즈를 가정하여 계측 데이터에 따른 모션 추정 민감도를 분석하고 예상되는 오차량을 검증하여 거동 계측에 필요한 정밀도를 확보하고자 함

■ 핵심기술 3 : 라이저의 거동 정밀 재현을 위한 해석적 모델 구축

- 일반적으로 유한요소해석의 목표는 하중이 작용할 때 구조물의 변위를 계산 하고 그에 따른 내력을 계산하는 것이나, 역으로 구조물의 각 절점의 변위를 알고 있다면 하중에 대한 정보가 없더라도 구조물의 내력을 바로 계산 할 수 있음

- 라이저의 모션을 측정 하고 운영 중인 라이저의 거동을 정밀히 재현 할 수 있는 해석적 모델이 있다면 해석모델에 라이저 모션을 변위하중으로 재하하여 내력 평가 및 피로수명을 예측 할 수 있음
- 수중 구조물은 교량, 건물과 같은 다른 진동 특성이 나타나며 라이저는 최대 5,000m 이상의 심해에서도 사용되고 있어 일반적인 구조물 모니터링 기법이 적용하기 곤란 할 수도 있음(Huang, 2012)
- 본 연구에서는 핵심기술1에서 구축된 라이저 거동 DB를 이용하여 라이저에 적합한 유한요소 모델 개선기법(Friswell and Mottershead,1995)에 대한 기술을 확보하고 해석의 효율성을 위한 국부해석모델 구축방법에 대한 기술을 확보하고자 함

■ 핵심기술 4 :모션 기반 수중 구조물 건전도 모니터링 기술 개발

- 라이저의 해석적 모델에 계산된 라이저 모션 데이터를 입력하여 라이저의 모션에 따른 내력상태와 피로 분석이 가능한 시스템을 개발함
- 라이저 설계 시 설정된 라이저 내력 검토 기준과 라이저 모션 해석을 통해 계산된 내력을 비교하고 거동 이상 유무를 판단하여 취약 부위를 도출하며, 모션을 이용한 피로 검토를 수행하여 피로 수명을 예측함
- 이를 통해 수중 구조물의 건전도 모니터링 기술 및 시스템을 개발하고자 함

제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

가. 연구 동향 및 학술적 흐름

■ 국외의 연구 동향

- 영국 HSE(1998a; 1998b), DNV-RP-F206(2008) 및 API-RP-17B(2003)은 라이저의 모니터링에 적용될 수 있는 기법을 소개, Boschee(2012)는 관련 기업체에서 평가한 각 기법의 적용성에 대하여 소개하고 있음
- API-RP-17B는 기법의 종류와 목적을 소개, DNV-RP-F206은 각 기법의 장단점까지 다루고 있음
- 현재 라이저의 모니터링에 적용되고 있는 기법 및 연구는 육안검사(Visual inspection)와 Ultrasonics, MFL, Radiography 등의 직접 접촉식 기법과 가속도, 변형률, 압력 등의 계측값을 이용한 구조물 전체의 건전성을 추정하는 건전도 평가 기법으로 분류 할 수 있음
- 직접 접촉식 방법은 라이저에 접근하는데 어려움이 따르며 표면 상태에 따라 검측의

한계가 존재하며, 라이저 거동 데이터를 이용한 건전도 평가 기법에 대한 연구가 진행 중이지만 아직 기초연구 수준의 단계임

■ 국내의 연구 동향

- 국내에서는 주로 재킷 타입의 해양 구조물 지지구조에 대한 건전도 모니터링 연구가 수행되고 있으며, 변형률과 경사계 데이터를 이용한 모니터링 연구가 진행되고 있음(박현준 외,2011, 이진학 외,2012)
- 라이저를 대상으로는 일부 건전도 모니터링 연구가 수행되고 있지만 아직 기초적인 적용 가능성 단계 확인 정도에 머무르고 있으며(민천홍 외 ,2012) 라이저에 대한 상세 해석 기술의 부재로 인해서 라이저의 거동을 정확히 재현하지 못하고 있음

나. 국내외 관련 기술 특허 동향

- 관련된 특허는 대부분 광섬유를 사용한 센싱 기법과 변형률, 가속도 측정 방법에 대한 것이 대부분이며 대표적인 특허는 다음 표와 같음

[표] 국내외 관련 기술 특허

국가	명칭	특허권자	등록 년도	내용
대한 민국	계류라인의 실시간 모니터링을 이용한 해양 구조물의 정적 및 동적 포지셔닝 시스템 및 방법	리 마이클 명섭	2013	계류라인의 실시간 모니터링을 통해 계류라인의 텐션을 측정하고 이에 맞추어 자동으로 적절한 해양 구조물의 정적 및 동적 포지셔닝 제어 및 관리
대한 민국	해양 구조물의 6자유도 운동의 실시간 모니터링을 이용한 해양 구조물의 정적 및 동적 포지셔닝 시스템 및 방법	리 마이클 명섭	2013	해양 구조물의 6자유도 운동을 실시간 모니터링하고 이에 맞추어 자동으로 적절한 해양 구조물의 정적 및 동적 포지셔닝 제어 및 관리
미국	DYNAMIC PERFORMANCE MONITORING OF LONG SLENDER STRUCTURES USING OPTICAL FIBER STRAIN SENSORS	Jerry Gene Williams	2007	라이저의 동적 움직임에 대한 라이저의 변형률을 측정하기 위해 광섬유 센서를 활용하는 법
미국	APPARATUSES AND METHODS FOR MONITORING STRESS IN STEEL CATENARY RISERS	Shell Oil Company	2008	라이저에 부가장치를 부착하고 그 장치의 변형률을 광섬유를 이용하여 모니터링 하는 시스템
미국	COMPOSITE RISER WITH INTEGRITY MONITORING APPARATUS AND METHOD	CONOCOPHI LLIPS COMPANY	2005	드릴링라이저의 변형률과 가속도를 측정하는 시스템

다. 국내외 시장분석 및 산업동향

■ 세계적으로 에너지 수요의 증가에 따라 해양 자원의 개발을 위한 해양 플랜트 산업의 시장 규모가 지속적으로 증가하고 있음

■ 국외 기술 및 산업 동향

- 라이저의 설계 및 해석 기술을 모두 보유하고 있음
- 변형률 및 가속도를 이용한 라이저 거동 모니터링에 대한 기술이 다양하게 활용되고 있으나, 이를 이용한 계측 데이터의 처리 기술 수준은 아직 미미한 수준임[표4]
- 모니터링 데이터를 이용한 건전도 평가 기술에 대한 요구가 증가하고 있음

[표] 국외 기술 및 산업 동향

관련기술	기관명	상세 기술
라이저 설계 및 거동해석 기술	SAIPEM (프랑스)	3,000m이상의 심해에서 시추·채굴하는 기술 및 설비
	Technip (프랑스)	라이저 설계 및 해양 플랜트 설계 기술
	OFFPIPE (미국)	해저 파이프 설치 시 파이프 유한요소 해석을 이용한 해석 프로그램 개발
	Texas A&M University (미국)	해양 플랜트(고정식/부유식 구조물)관련 설계 및 해석 기술 보유
라이저 모니터링 기술	National Instruments (미국)	드릴쉽과 반잠수식 라이저의 모니터링 기술 보유
	Pulse Structural Monitoring (영국)	변형률 기반의 라이저 모니터링 기술과 가속도를 이용한 모니터링 기술 보유
	2H Offshore (미국)	3축 가속도 2축 경사계를 이용한 라이저 거동 모니터링 기술
	BP (영국)	해상 플랫폼을 육상에서 원격 조정하여 운영하는 기술 보유

■ 국내 기술 및 산업동향

- 해저 파이프 설치를 위한 설계 및 해석 기술개발에 치중되어 있음
- 재킷식 해양 구조물에 대한 연구에 집중되어 있으며, 변형률과 계측 가속도를 이용하여 동특성 분석을 통한 장기거동 예측이 주류를 이룸[표 2.5]

[표] 국내 기술 및 산업 동향

관련기술	기관명	상세 기술
해저파이프 설계 및 거동해석 기술	현대중공업	Top Tensioned Risers 설계 기술 Offpipe Program을 이용한 Pipeline Laying 설계 해석, 설치 해석
	한국 가스공사	가스 파이프 라인의 변형률기반 한계상태 분석 기술 및 인장성능평가 수치해석 기법
해양구조물 모니터링 기술	KAIST	BOTDA 시스템을 이용한 해저파이프라인 모니터링 기술 실현성에 관한 기초 연구 수행
	KAIST	광섬유 브래그 격자 센서를 활용한 재킷식 해양구조물의 손상 감지 기법 기술
	한국해양 과학기술원	재킷식 해양구조물 시공 중 및 운영 중 장기 변형률 계측 및 분석 기술

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 연구수행 전략 및 방법론

가. 연구개발 흐름도

본 연구는 원천기술 개발을 목표로 새로운 기법을 제시하는데 목표가 있으며 R&D 단계의 연구개발 절차는 다음 그림 2.1과 같다.

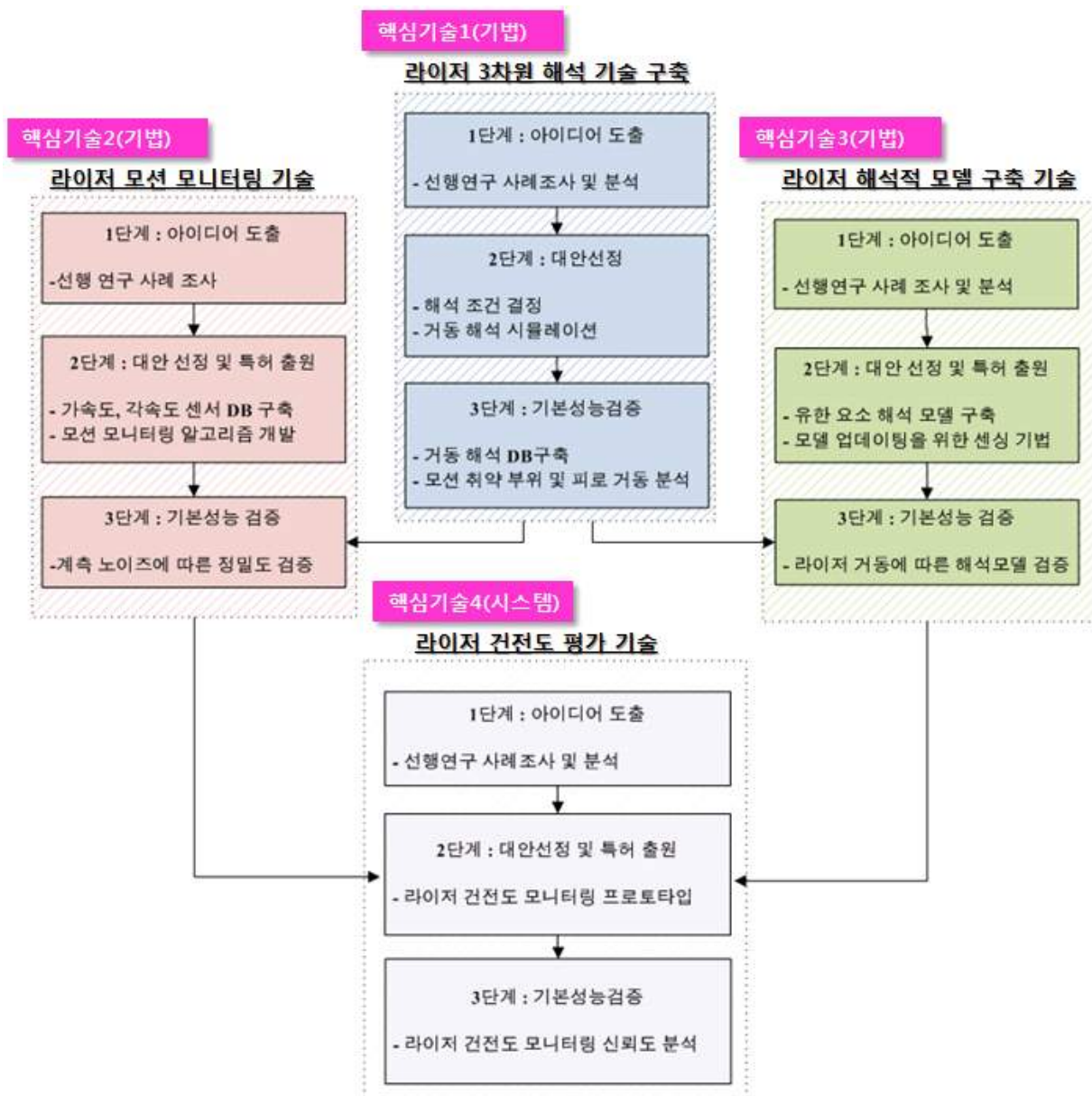


그림 2.1 핵심기술에 따른 연구개발 흐름도

나. 연구개발 단계에 따른 세부연구내용

연구 개발 내용에 따른 각각의 방법론은 다음과 같다.

(1) 라이저 3차원 해석 기술 구축

기간	단계별 주요 연구활동	세부추진내용
1단계	선행연구 사례조사 및 분석	- 해외 논문 및 학회지 조사 분석 - 부유식 플랜트 종류 조사 및 특징 분석 - 라이저, 플랫폼 거동 특성 유도
2단계	해석 조건 결정	- 파랑하중, 조류하중, 풍하중의 환경하중 조건 분석 - 라이저 해석 조건 결정 - 플랫폼 해석 조건 결정
	거동 해석 시뮬레이션	- WAMIT을 이용한 플랫폼 부유체 해석 - HARP를 이용한 플랫폼/계류선/라이저 거동 해석 - 라이저 6자유도 모션값 산정
3단계	거동 해석 DB 구축	- 라이저 형상에 따른 모션 DB 구축 - 플랫폼 거동에 따른 라이저 모션 DB 구축 - 다양한 환경하중 조건에 따른 라이저 모션 DB 구축
	취약 부위 및 피로 거동 분석	- 이상 상황 모니터링을 위한 라이저 관리 기준치 설정 - 라이저의 거동 특성을 반영한 내력계산 방법 연구 - 라이저 손상에 따른 가속도, 각속도 변화 연구 - 라이저의 모달 파라미터 산정 연구

(2) 라이저 모션 모니터링 기술

기간	단계별 주요 연구활동	세부추진내용
1단계	선행연구 사례조사	- 해외 논문 및 학회지 조사 분석 - 모션 모니터링 기술 조사 분석
2단계	가속도, 각속도 센서 DB 구축	- 가속도 계측 센서 장비 조사 및 분석 DB구축 - 각속도 계측 센서 장비 조사 및 분석 DB구축 - 계측 장비 정밀도 분석 - 수중 구조물 모니터링에 적합한 장비 스펙 선정
	모션 모니터링 알고리즘 개발	- 3차원 가속도, 각속도를 이용한 모션 알고리즘 개발
3단계	계측 노이즈에 따른 정밀도 검증	- 모션 모니터링 알고리즘 문제점 및 보완 - 수중 조건에서의 노이즈 특성 분석 - 3차원 방향별 노이즈에 따른 모션 계산 민감도 분석 - 랜덤 노이즈에 따른 모션 계산 민감도 분석

(3) 라이저 해석적 모델 구축 기술

기간	단계별 주요 연구활동	세부추진내용
1단계	선행연구 사례조사	- 해양 분야 관련 기술 동향 조사 및 분석 - 모델 업데이트 기법 조사 및 분석 - 모델 업데이트를 위한 센싱 기법 조사 분석
2단계	유한요소 해석 모델 구축	- 라이저 유한 요소 모델 구축 - 해석 모델의 신뢰성 검증 - 라이저 국부해석 모델 기법 검토 - 라이저에 적합한 유한요소 해석 모델 구축 방법
	모델 업데이트를 위한 센싱 기법 선정	- 라이저 진동 데이터를 이용한 SI 기법 검토 - 라이저 진동 이외의 데이터를 이용한 SI 기법 검토
3단계	라이저 거동 DB를 이용한 해석 모델 검증	- 라이저 형태에 따른 해석 모델 정밀도 검증 - 계측 노이즈에 따른 해석 모델 정밀도 검증

(4) 라이저 건전도 평가 기술

기간	단계별 주요 연구활동	세부추진내용
1단계	선행연구 사례조사	- 토목 구조물 건전도 모니터링 기법 조사 분석 - 해양 구조물 건전도 모니터링 기법 조사 분석 - 라이저 건전도 모니터링 기법 조사 분석 - 피로 수명 평가 기법 조사 분석
2단계	라이저 건전도 모니터링 프로토 타입 개발	- 라이저 모션을 이용한 라이저 내력 해석 기법 연구 - 라이저 모션을 이용한 피로 수명 평가 기법 연구 - 라이저 건전도 모니터링 기술
3단계	라이저 건전도 모니터링 신뢰도 분석	- 모니터링 프로토타입 정밀도 개선 연구 - 계측 노이즈에 따른 라이저 내력 분석 오차 연구 - 계측 노이즈에 따른 라이저 피로 분석 오차 연구 - 구축 DB를 이용한 라이저 취약 부위 산정 연구 - 구축 DB를 이용한 라이저 피로 수명 예측 연구

제2절 연구수행 과정 및 결과

* 상세한 내용은 부록으로 첨부하였으며, 본 보고서에는 요약본으로 제시하였다.

가. 라이저 거동해석 알고리즘

라이저의 3차원 거동 해석을 위한 해석 Flow Chart를 제시하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 FPSO용 라이저는 부유체에 부착되어 있는 형태 이므로 라이저의 거동해석을 위해서는 플랫폼/계류선/라이저를 고려한 상호작용 해석 기술을 필요로 한다. 이러한 라이저의 거동 해석을 하기 위해서는 그림 2.2와 같이 총 3단계를 수행해야 한다. 1단계에서는 부유체의 Hydrodynamic Coefficient인 부가 질량 계수, damping 상수 등을 계산하여 해석 프로그램에 입력하기 위한 물성치를 계산한다. 2단계에서는 부유체에 작용하는 파랑하중, 풍하중, 조류하중을 산정한다. 파랑 하중과 풍하중은 시간에 따라 변화하므로 주로 해당 지역에 맞는 에너지 스펙트럼을 이용해서 파랑과 풍하중 이력을 생성하게되며, 조류는 시간에 따라 변화하지 않으므로 정적하중으로 고려할 수 있다. 마지막 단계에서는 모리슨 방정식과 파랑에너지 이론, 라이저 해석 이론을 이용해 플랫폼/계류선/라이저의 상호작용 해석을 수행한다. 상호작용 해석을 위해서는 시간이력 해석을 수행하여야 한다.

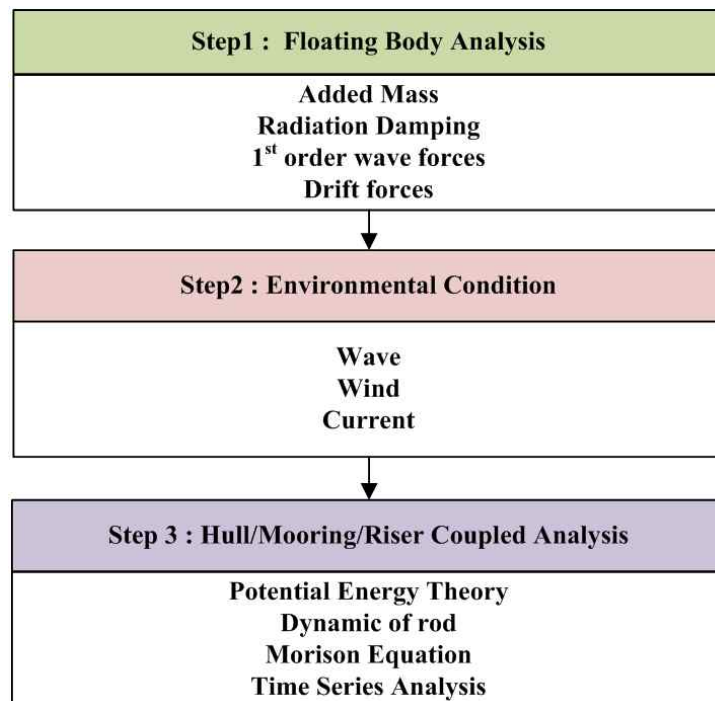


그림 2.2 라이저 3차원 해석 Flow Chart

나. 해석프로그램 이론 검증

본 성과는 앞서 구축된 플랫폼/계류선/라이저 거동해석 Flow Chart를 통해 계산된 라이저

의 모션 정보로부터 라이저의 내력을 계산하기 위한 해석 이론을 구축하고자 한다. 먼저 라이저 해석관련 Design Code를 분석함으로써 해석 주안점을 분석하고 내력계산 이론을 구축하였다.

■ 라이저 Design Code 분석

라이저는 고압의 원유 또는 가스가 이송되는 관으로 라이저의 안전성을 확보하기 위해 다음과 같은 항목들을 검토하도록 하고 있다.

- **Bursting** : 라이저의 내압이 라이저 벽체의 강도보다 크게 작용한다면 파괴가 발생하는데 이러한 파괴를 bursting이라고 한다.(DNV-OS-F201)

$$(p_{li} - p_e) \leq \frac{p_b(t_1)}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}}$$

여기서, p_{li} , p_e : 각각 내압과 외압

γ_m : 안전등급에 따른 저항계수

(낮음:1.04, 보통:1.14, 높음:1.26)

γ_{SC} : 재료 저항계수(ULS&ALS:1.15, SLS&FLS:1.0)

$P_b(t)$: Burst 저항강도이며, 아래의 식으로 계산함.

$$p_b(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2t}{D-t} \cdot \min(f_y \cdot \frac{f_u}{1.15})$$

- **Hoop Buckling** : 심해의 경우 라이저에 매우 큰 외압이 작용하여 단면의 좌굴파괴가 발생할 수 있으며, 이러한 현상을 Hoop Buckling이라고 한다. (DNV-OS-F201)

$$(p_e - p_{\min}) \leq \frac{p_c(t_1)}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}}$$

여기서, $p_{\min}$: 최소 내압

p_c : Hoop Buckling 저항계수이며 다음의 식으로 계산함.

$$(p_c(t) - p_{el}(t)) \cdot (p_c^2(t) - p_p^2(t)) = p_c(t) \cdot p_{el}(t) \cdot p_p(t) \cdot f_0 \cdot \frac{D}{t}$$

- **Von-Mises Stress Criteria** : 일반적으로 라이저는 극한 환경하중이 작용할 때 본미

세스 응력을 사용하여 라이저의 파괴를 분석하도록 하고 있다.

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_n - \sigma_h)^2 + (\sigma_h - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_n)^2}$$

여기서, σ_v : 본미세스 응력

σ_n : 축력+휨 법선 응력

σ_h : Hoop Stress

σ_r : Radial Stress

API RP 2RD에 따르면 극한 조건이나 생존조건에서 본미세스 응력이 다음의 기준을 넘지 않도록 하고 있다.

$$\sigma_v \leq C_f \sigma_a = C_f C_a \sigma_y$$

여기서, C_f : Design case factor

(for extreme environmental condition, 1.2)

σ_a : Basic allowable combined stress = $C_a \sigma_y$

C_a : Allowable stress factor, (=2/3)

σ_y : Minimum yield strength

■ 라이저 내력 해석

라이저에 지배적으로 작용하는 내력은 축력, 휨모멘트, 비틀림 모멘트와 전단력이다. 지배적인 내력에 따라 라이저 단면에 작용하는 응력은 다음의 식과 같이 계산 될 수 있다.

- **Axial Stress** : 축응력은 크게 두가지의 요인에 의해서 발생한다. 인장력과 압축력에 의해서 발생하는 축응력, 휨모멘트 효과로 인해서 발생하는 축응력이다. 축하중 F 가 라이저의 단면적 A 에 작용할 때 축하중에 의한 축응력은 다음의 식과 같다. 여기서 단면적 A 는 라이저 외경에서 내경을 뺀 순단면적이다.

$$\sigma_{axial} = F / A$$

라이저에서 축응력은 라이저 텐션너에 의해서 도입되는 초기 장력과 라이저의 자중으로 인한 효과, 플랫폼의 거동에 따른 압축력과 인장력이 지배적인 요인으로 작용한다. 일반적으로 SCR의 경우 수심이 깊어질수록 라이저의 자중이 감소하기 때문에 플랫폼 연결부에서의

축력이 가장 크게 나타나며 해저로 갈수록 줄어드는 경향을 나타낸다.

라이저는 3차원거동을 나타내므로 휨모멘트 고려시 x,y축에대한 모멘트를 고려해야 하며 다음과 같이 식으로 표현된다.

$$\sigma_{b,normal} = \pm \frac{M_y}{I_y} \mp \frac{M_z}{I_z} y$$

여기서, M_x : the moment about x-axis
 M_y : the moment about y-axis
 I_x : the 2nd moment of area about x-axis
 I_y : the 2nd moment of area about y-axis

최종적으로 축응력은 위 두 개의 식을 합하여 구할 수 있으며, 다음 그림 2.3과 같이 모식할 수 있다.

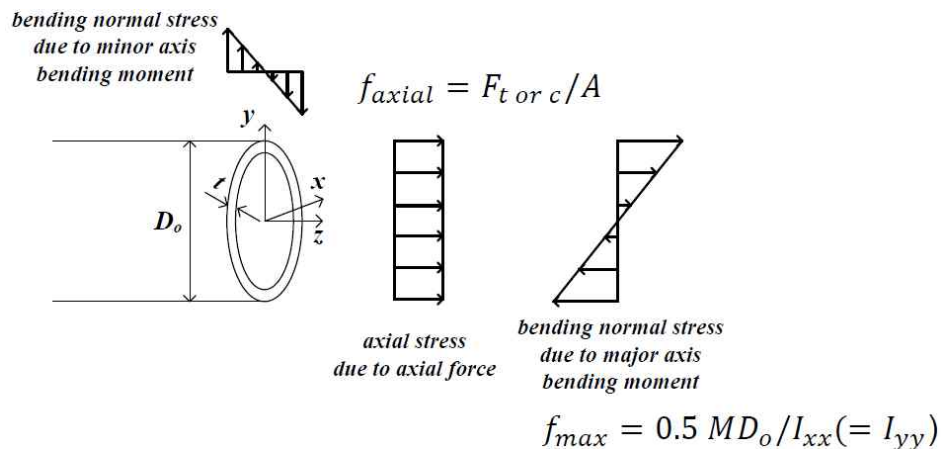


그림 2.3 Axial Force와 Bending Moment에 의한 Axial Stress

- Radial and Hoop Stress : Hoops Stress($f_{p\theta}$)와 Radial Stress(f_{pr})은 라이저의 내압과 외압으로 인해서 발생하는 응력이며 다음 식, 그림 2.4 과 같다.

$$f_{pr} = - \frac{(P_0 D_0 + P_i D_i)}{D_0 + D_i}$$

$$f_{p\theta} = (P_i - P_0) \frac{D_0}{2t} - P_i$$

여기서, P_i, P_0 : 각각 라이저의 내압과 외압

D_i, D_0 : 각각 내경과 외경

t : 라이저 관의 두께

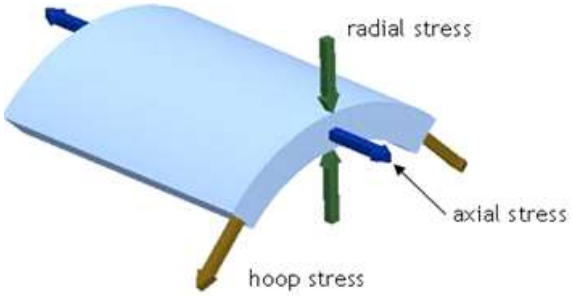


그림 2.4 Radial Stress와 Hoop Stress

- Bending Shear and Torsional Shear Stress : 라이저의 단면에는 전단력과 휨모멘트에 의해서 굽힘전단응력과 비틀림모멘트에 의해서 비틀림전단응력이 발생하며 다음 식, 그림과 같다. $f_{p\theta}$ 와 Radial Stress(f_{pr})은 라이저의 내압과 외압으로 인해서 발생하는 응력이며 다음 식, 그림 2.5과 같다.

$$\tau_{bs} = \frac{V \sin \theta}{\pi R t} , \quad \tau_{\max} = \frac{V}{\pi R t} \cong 2 \times \text{mean shear stress} \left(\frac{V}{A} \right)$$

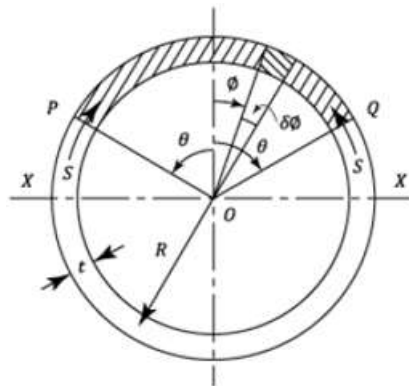


그림 2.5 전단응력

다. 라이저 거동해석 Database 구축

라이저 거동 해석 Database 구축을 위해서 CHARM3D 해석 프로그램을 이용하여 여러 환경 조건에 따른 거동 해석을 수행하여 라이저의 내력과 피로해석을 실시하여 본 연구에서 개발하고자 하는 모니터링 기술의 검증 기초자료로 활용하고자 한다.

라이저 해석을 위해서는 우선 부유체(FPSO)모델, 계류선(Mooring) 모델, 라이저 모델을 선정한다. 그리고 부유체에 Wave, Wind의 환경 하중이 작용할 때 부유체의 움직임과 라이저의 내력을 계산하게 된다. 이때 Wave와 Wind는 확률분포모델을 이용하게 된다. 이러한 모델 정보는 CHARM3D 프로그램상에 입력하게 된다. 상세 정보는 다음과 같다.

■ 해석 모델

- FPSO Model: 본 연구에 사용된 FPSO 모델은 1,829m 수심에 계류되어 있는 200,000 DWT 탱크 용량을 가지고 있는 FPSO이며, Tahar and Kim(2003)의 연구에 사용되었던 모델로 상세 정보는 다음 표와 같다.

표 Main particulars of the vessel (Taha and Kim 2003)

Designation	Unit	Quality
Production level	bpd	120,000
Storage	bbls	1,440,000
Vessel size	kDWT	200.0
Length between perpendicular	m	310.00
Breadth	m	47.17
Depth	m	28.04
Draft	m	18.9
Displacement	MT	240,869
Length-beam ratio		6.57
Beam-draft ratio		2.5
Block coefficient		0.85
Center of buoyancy Forward section10	m	6.6
Center of gravity above Base	m	13.3
Water plane area	m ²	13,400
Frontal wind area	m ²	1011.7
Transverse wind area	m ²	3771.9
Roll radius of gyration at CG	m	14.77
Pitch radius of gyration at CG	m	77.47
Yaw radius of gyration CG	m	79.30
Turret in center line behind Fpp (20.5% Lpp)	m	63.55
Turret elevation below tanker base	m	1.52
Turret Diameter	m	15.85

- Mooring lines and Riser : 총 12개의 계류선이 연결되어 있으며, 각 3개씩 총 4 그룹으로 4면으로 고정되어 있다. 각 계류선 그룹은 90°각도로 떨어져 있으며, 3개의 계류선은 각각 5°의 간격으로 연결되어 있다. 라이저는 총 13개의 SCR이 연결되어 있으며, 연결 형상은 그림 2와 같다. 계류선과 라이저에 대한 상세정보는 각각 다음표와 같다.

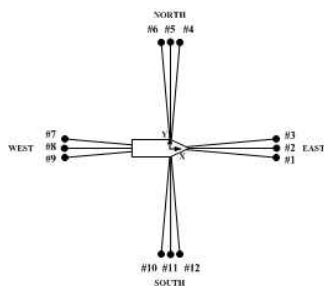


그림. 계류선(Mooring) 형상

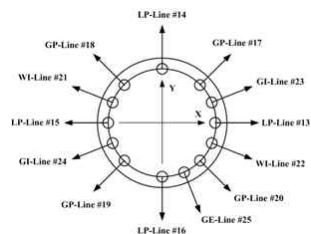


그림. Riser 형상

표. 라이저 물성 상세정보

Designation	OD (m)	T (m)	EA (kN)	EI (kN • m ²)	Weight		Cdn
					dry (kg/m)	wet (kg/m)	
Liquid production risers	0.254	0.023	3.34E+06	2.25E+04	133.6	98.6	1
Gas production risers	0.386	0.018	4.16E+06	7.06E+04	166.5	46.6	1
Water injection risers	0.531	0.018	5.80E+06	1.91E+05	232.1	197.6	1.414
Gas injection risers	0.287	0.020	3.36E+06	3.01E+04	134.2	67.9	1.414
Gas export risers	0.343	0.017	3.48E+06	4.64E+04	139.3	44.6	1

표. 계류선 물성 상세정보

Designation	Unit	Value
Water depth	m	1829
Pre-tension	kN	1424
Number of lines		4 x 3
Degree between the 3 lines	deg.	5
Length of mooring line	m	2652
Radius of location of chain stoppers on turn table	m	7
Segment 1(ground section): Chain		
Length at anchor point	m	121.9
Diameter	cm	9.52
Dry weight	N/m	1856
Weight in water	N/m	1615
Stiffness AE	kN	912081
Mean breaking load (MBL)	kN	7553
Segment 2: Polyester Rope		
Length	m	2438
Diameter	cm	16
Dry weight	N/m	168.7
Weight in water	N/m	44.1
Stiffness AE	kN	186825
Mean breaking load (MBL)	kN	7429
Segment 3(ground section): Chain		
Length at anchor point	m	91.4

- 환경하중조건 : 본 연구에서는 Gulf of Mexico 지역의 허리케인 100년, 200년 조건을 이용하여 wave와 current를 산정하였다. wave산정을 위해서는 JONSWAP 스펙트럼을 이용

하였으며, 해석 시간은 허리케인이 강타했을 때의 시간을 고려하여 3시간으로 생성하였다. Wave와 Current는 각각 표 4와 표 5와 같다. 이외에도 일반적인 상태의 환경하중으로 고려하기 위해서 각각 ($H_s=6$, $T_p=10$), ($H_s=6$, $T_p=20$) 일때를 고려하여 총 4개의 환경하중조건에서 해석을 수행하였다.

표. Wave Condition

Designation	Unit	100 yr	200 yr
H_s	m	15.79	16.50
T_p	sec	15.40	15.70
Spectrum	JONSWAP ($\gamma=2.4$)		
Direction	Deg	180°	

표. Current Profile

Designation	Unit	100 yr	200 yr
0	m/s	2.40	2.55
50.40 / 53.55	m/s	1.80	1.91
100.8 / 107.1	m/s	0	0

풍속스펙트럼은 API Bulletin 2INT-MET의 에너지 스펙트럼을 이용하였으며, 다음식과 같다.

$$S(f) = \frac{320 \left(\frac{U_0}{10} \right)^2 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.45}}{\left(1 + \tilde{f}^n \right)^{(5/3n)}}$$

$$\tilde{f} = 172 f \left(\frac{z}{10} \right)^{2/3} \left(\frac{U_0}{10} \right)^{-0.75}$$

여기서, $n = 0.468$

$S(f) (m^2 s^{-2} / Hz)$: the spectral energy density at frequency (Hz)

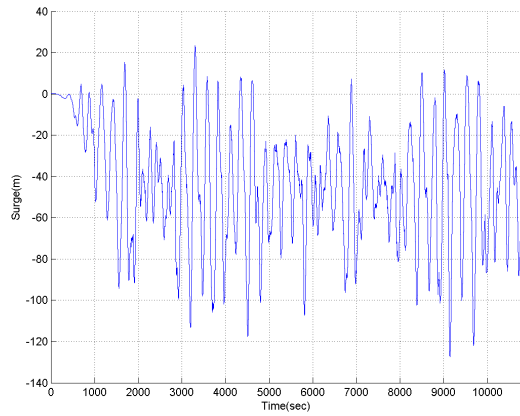
$z(m)$: the height above sea level

$U_0(m/s)$: the 1-hour mean wind speed at 10m above sea level

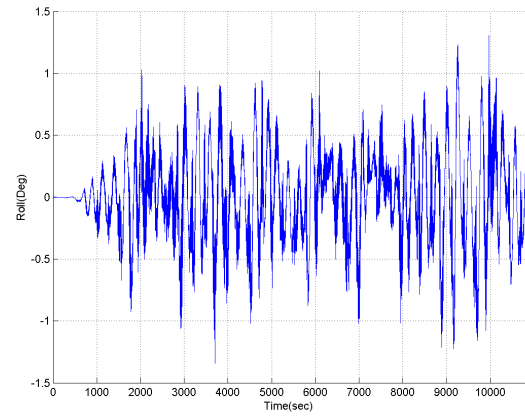
여기서 U_0 기준 풍속은 100yr: 48.0 m/s, 200yr: 51.0m/s이다.

각각 100년, 200년 주기 허리케인 환경하중에 따른 거동 해석 결과는 다음 그림과 같다.

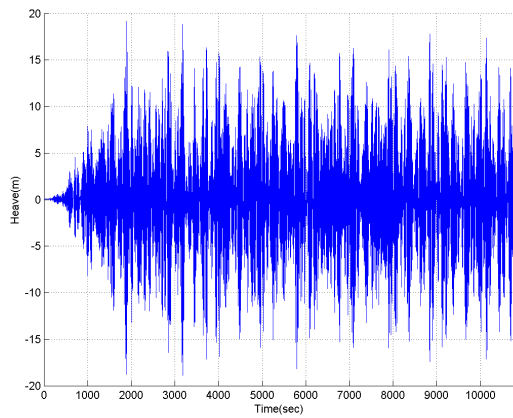
- Case 1: 100년 주기 허리케인 환경하중



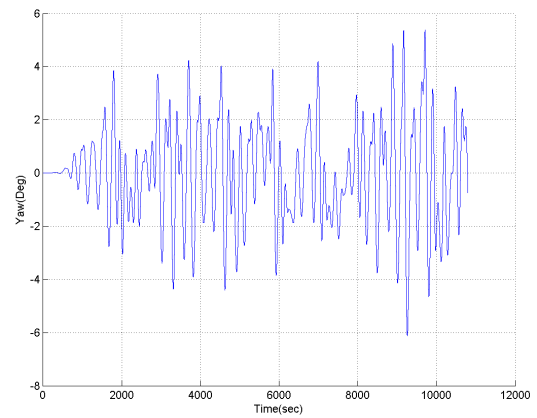
a) Surge



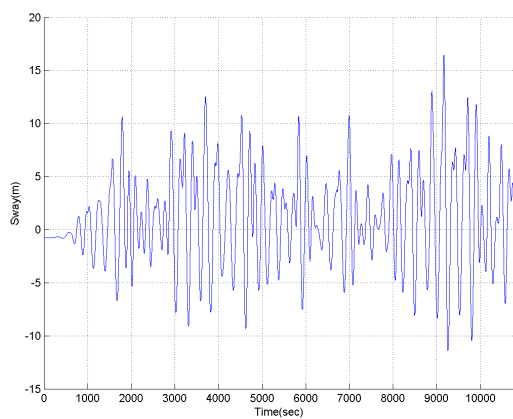
d) Roll



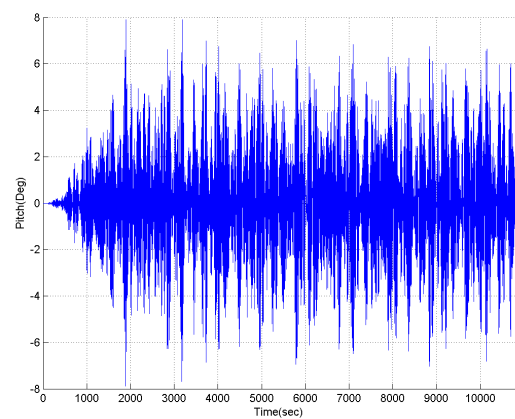
b) Heave



e) Yaw

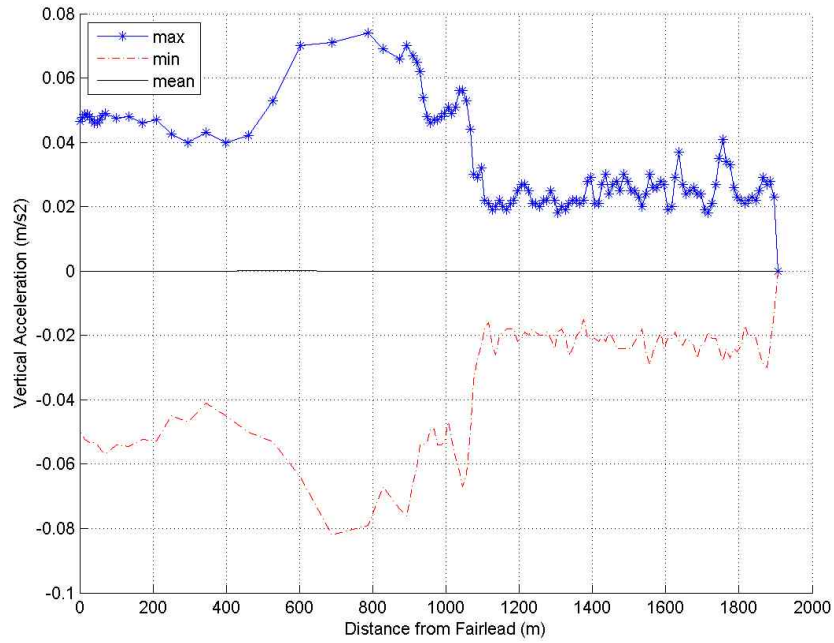


c) Sway

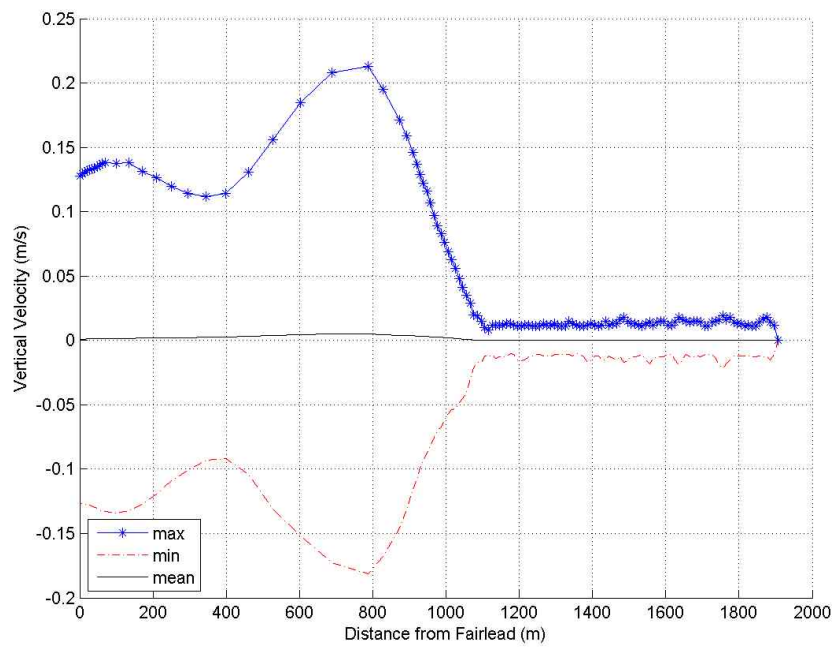


f) Pitch

그림. 100년 주기의 허리케인 조건일 때의 플랫폼의 움직임(3시간)

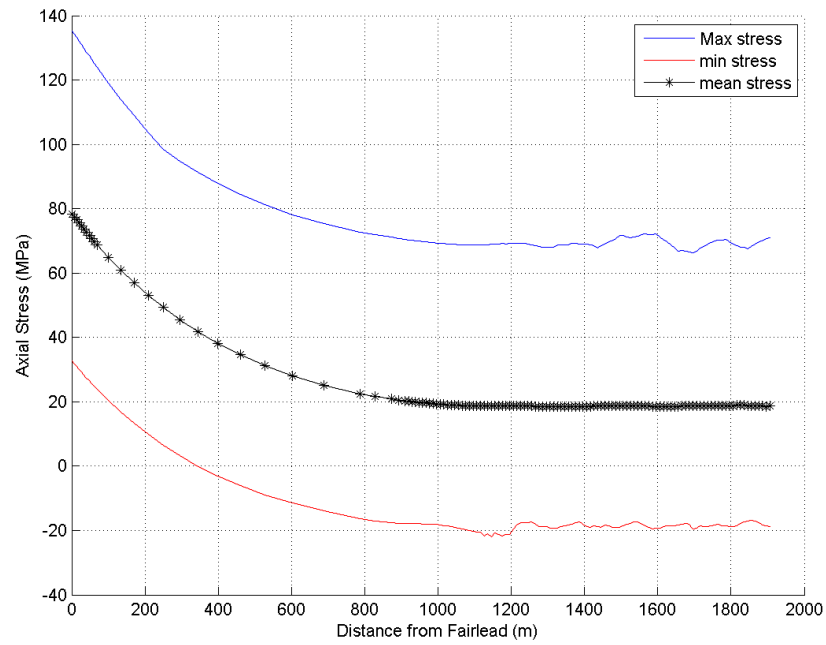


a) Vertical Acceleration

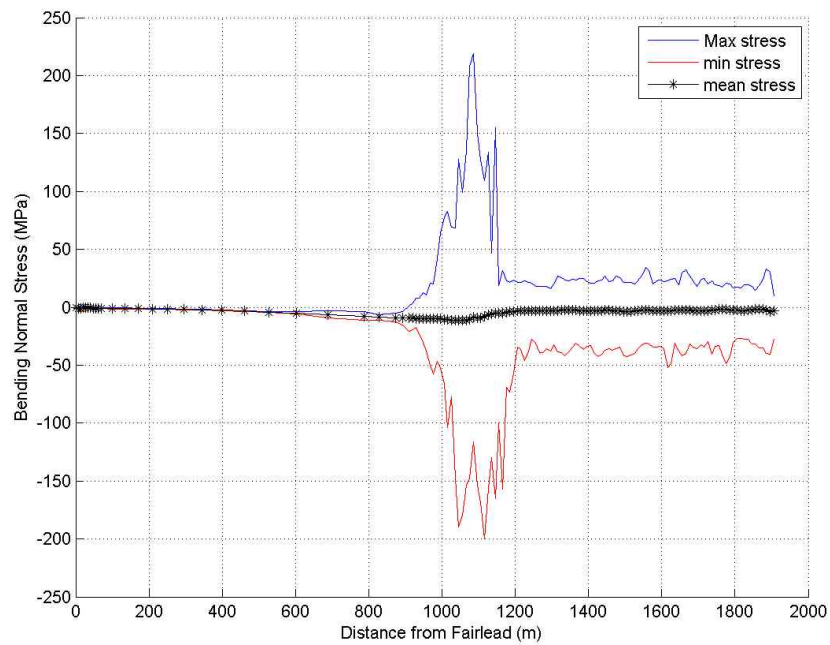


b) Vertical Velocity

그림. 100년 주기의 허리케인 조건일 때의 라이저의 움직임(3시간)



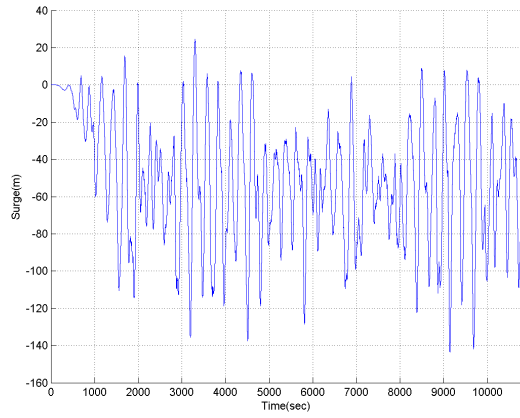
a) Axial Stress



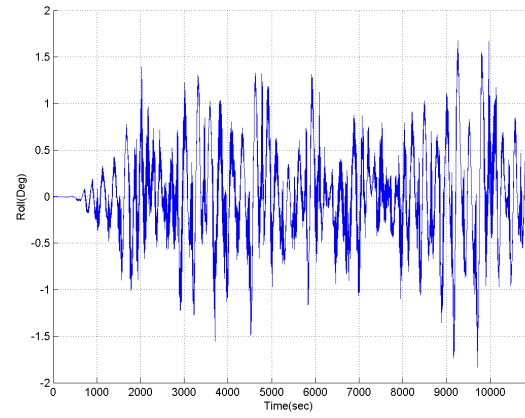
b) Bending Normal Stress

그림. 100년 주기의 허리케인 조건일 때의 라이저의 내력 (3시간)

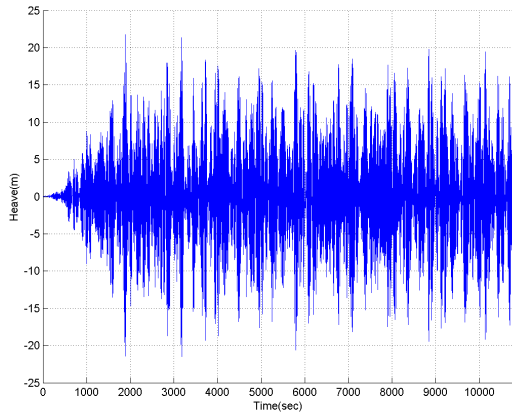
- Case 2: 200년 주기 허리케인 환경하중



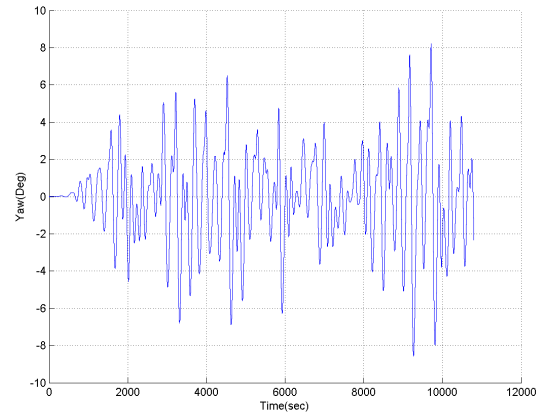
a) Surge



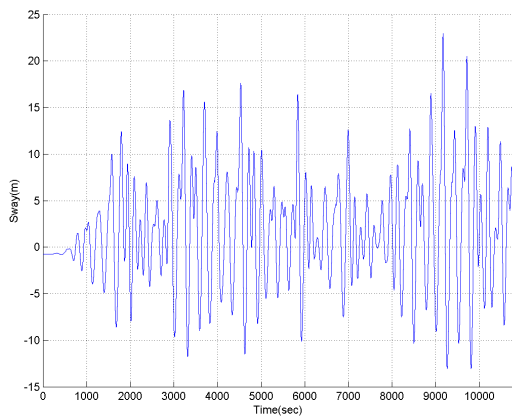
d) Roll



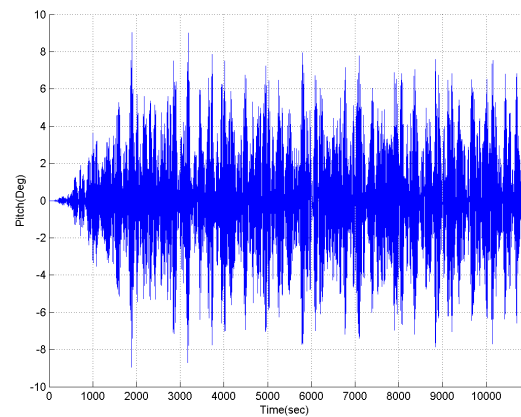
b) Heave



e) Yaw

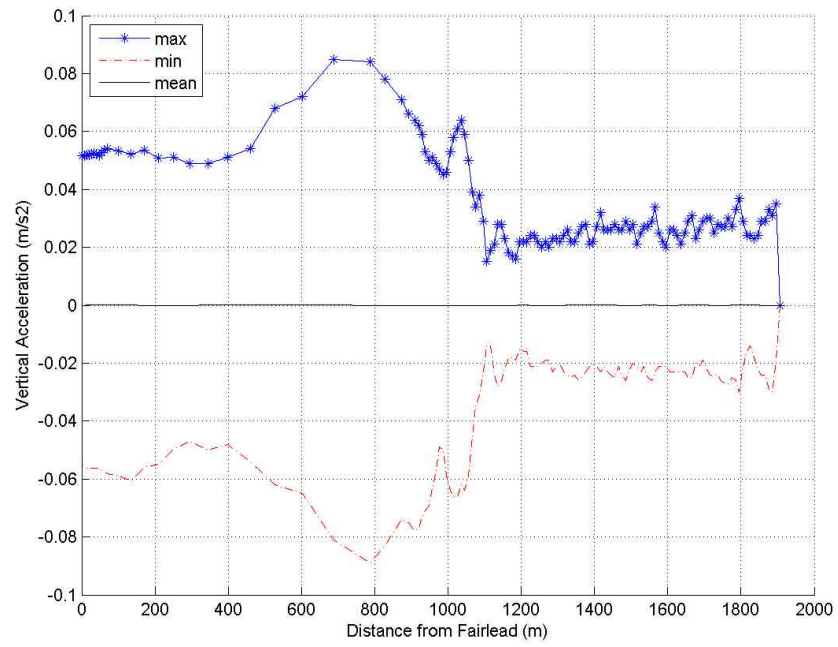


c) Sway

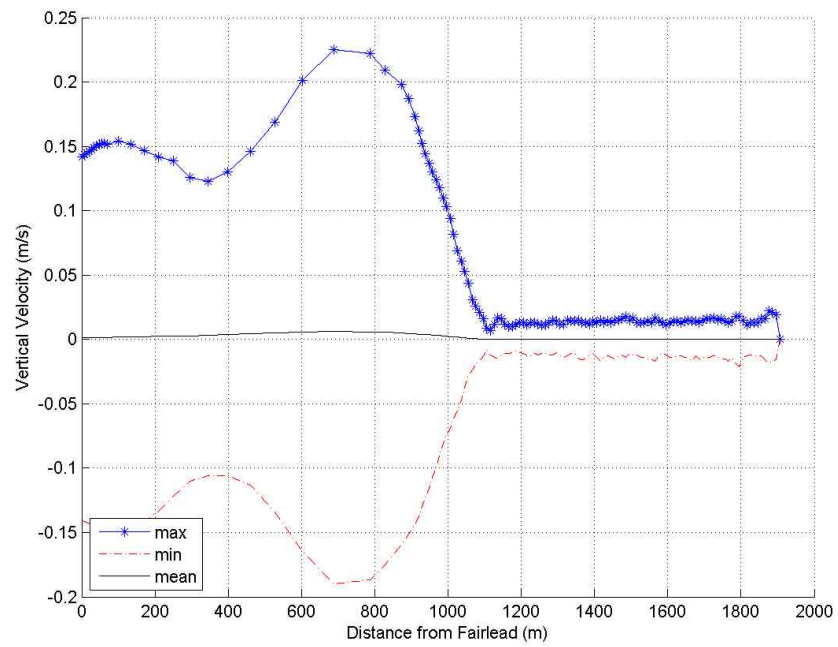


f) Pitch

그림. 200년 주기의 허리케인 조건일 때의 플랫폼의 움직임(3시간)

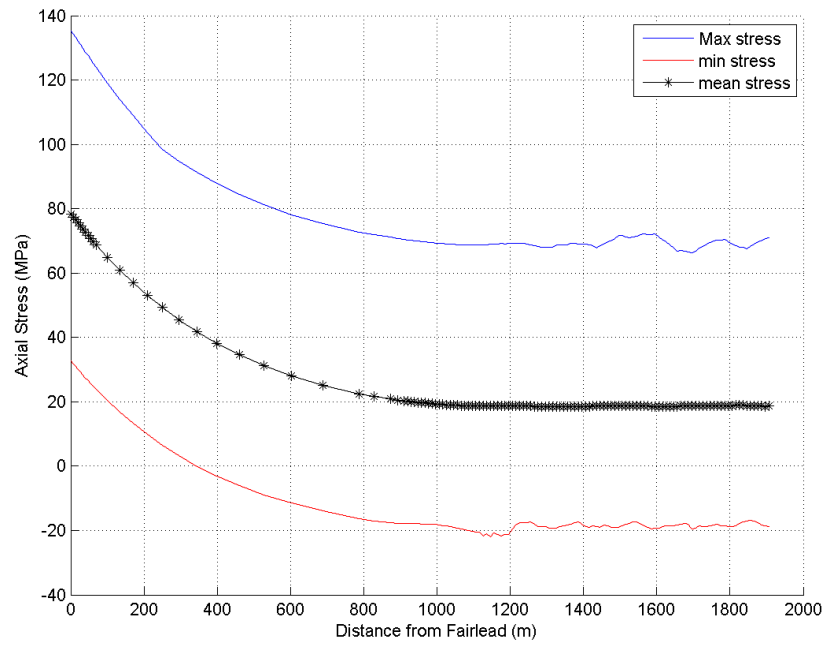


a) Vertical Acceleration

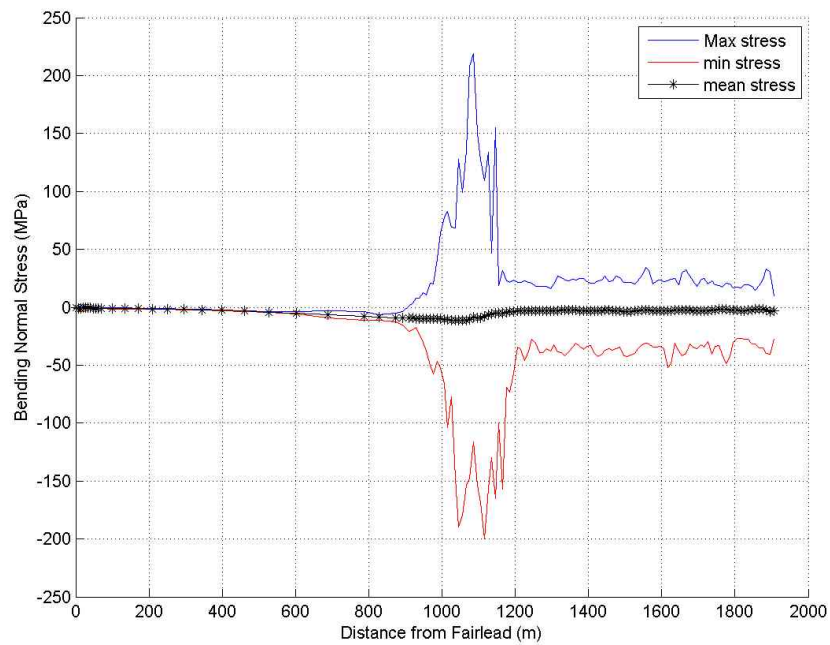


b) Vertical Velocity

그림. 200년 주기의 허리케인 조건일 때의 라이저의 움직임(3시간)



a) Axial Stress



b) Bending Normal Stress

그림. 200년 주기의 허리케인 조건일 때의 라이저의 내력 (3시간)

라. 라이저 피로수명 평가 기준

본 연구에서 대상으로 하는 라이저는 부유식 플랫폼에 연결되어 있으므로 플랫폼의 움직임에 따라서 라이저도 같이 거동을 한다. 이러한 이유로 라이저는 지속적인 변동응력 상태를 경험하게 되는데 이는 피로 파괴로 직결될 수 있는 문제이다. 본 성과는 라이저에서 중요한 피로수명을 분석하기 위해서 피로 설계 관련 디자인 코드를 분석하였다.

■ 피로해석

반복적인 동하중을 받는 구조물은 하중 자체의 크기가 항복응력에 미치지 않더라도 어느 정도 하중을 반복해서 받게 되면 파괴에 도달 할 수 있다. 이러한 파괴를 피로파괴(Fatigue Failure)라고 부르며, 피로를 일으키는 반복회수를 피로수명(fatigue life)로 정의한다.

피로수명을 예측하는 방법에는 마이너 누적손상법칙(Minor cumulative damage rule), Mansion 방법(Mansion method), Goodman의 피로방정식(Goodman fatigue equation) 그리고 Soderberg 관계식(Soderberg relation)이 대표적이다. 동하중이 삼각함수와 같이 단순한 주기를 나타내는 경우에는 Goodman의 피로방정식을 통해 간단히 피로파괴 여부를 판단할 수 있지만, 그렇지 않고 복잡한 주기를 나타내는 경우에는 마이너 누적손상법칙을 사용해야 한다. 한편 피로기준으로 항복응력(yield stress)에 보다 관심이 있다면 Soderberg 관계식을 사용하면 된다.

따라서 피로수명을 예측하기 위해서는 해당 물체에 작용하는 사이클 하중에 따른 응력변동을 구해야 하며 한 주기동안 물체 내부의 응력변동을 구한다음 여러 개의 주기를 가진 응력 사이클로 분리하고 각 응력 사이클에 대한 데이터를 토대로 마이너 누적손상법칙과 해당 물체의 S-N 선도(S-N diagram) 혹은 E-N 선도(E-N diagram)를 혼합 적용하여 피로수명을 예측하게 된다

■ 피로해석 절차

라이저의 피로 해석은 크게 단주기 피로해석과 장주기 피로해석으로 구분할 수 있다. 단주기 피로해석의 경우 허리케인과 같이 극한의 환경조건일 때의 단시간(1시간, 3시간)의 응력 변동 결과를 이용해 계산하는 방법이며, 장주기 피로해석은 년 단위의 시간을 기준으로 피로를 분석하는 방법이다. 본 연구에서는 우선 단주기 피로해석에 대해서 논의하고자 한다. 단주기 피로해석의 절차는 다음 그림과 같다.

해석프로그램을 이용하여 시간에 따른 라이저의 응력 변화를 계산한다. 계산된 응력 변화량을 이용하여 응력의 평균응력을 계산한다. 라이저의 경우 일반적이 구조물과는 달리 자중과 텐서너에 의해서 상당히 큰 축력이 작용하고 있기 때문에 평균응력을 피로 수명평가에 보정해 줘야한다. 평균응력을 보정하는 모델은 Soderberge Model, Goodman Model, Gerver Model등이 있다. Rainflow Counting방법을 이용하여 응력 변화 사이클 히스토그램을 만든다. 이렇게 만들어진 히스토그램을 Palmgen-Miner's rule을 이용하여 피로 수명을 산정한다.

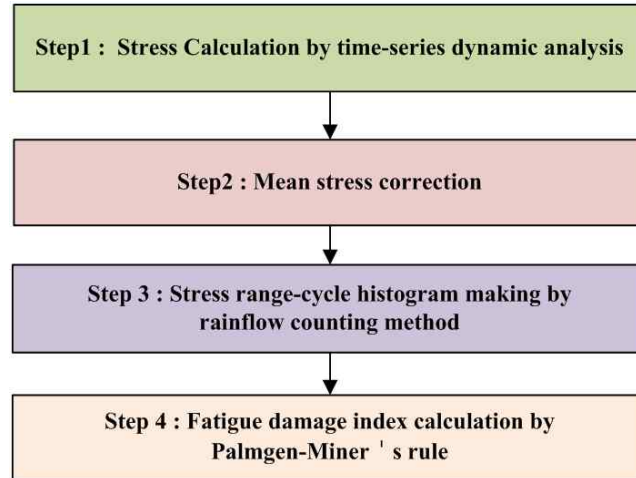


그림. 피로해석 절차

■ 라이저 Design Code 분석

라이저에 대한 디자인코드는 DNV-RP-F 204 Riser Fatigue를 참고 할 수 있으며 관련된 디자인 코드들은 다음과 같으며, 피로 평가 절차는 표와 같다.

표. 일반적인 피로평가 고려 절차 (DNV-RP-F204)

Task	Comment
Define fatigue loading.	Based on operating limitations including WF, LF and possible VIV load effects
Identify locations to be assessed	Structural discontinuities, joints (girth pipe welds, connectors, bolts), anode attachment welds, repairs, etc.
Global riser fatigue analysis	Calculate short-term nominal stress range distribution at each identified location.
Local joint stress analysis	Determination of the hot-spot SCF from parametric equations or detailed finite element analysis
Identify fatigue strength data	S-N curve depends on environment, construction detail and fabrication among others
Identify thickness correction factor	Apply thickness correction factor to compute resulting fatigue stresses
Fatigue analyses.	Calculate accumulated fatigue damage from weighted short-term fatigue damage.
Further actions if too short fatigue life.	Improve fatigue capacity using: – more refined stress analysis – fracture mechanics analysis – change detail geometry – change system design – weld profiling or grinding – improved inspection /replacement programme

DNV-OS-F101 : Submarine Pipeline System

DNV-RP-C203 : Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structures

DNV-RP-C205 : Environmental Conditions and Environmental Loads

DNV-RP-F105 : Free Recommended Practice

API RP 2 RD : Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and
Tension-Leg Platforms(TLSs)

피로수명은 다음의 식을 만족해야 한다.

$$D_{fat} \circ DFF \leq 1$$

여기서, D_{fat} : Palmgren-miner 법칙으로 계산된 누적 피로 손상

DFF : 피로 설계 계수

(낮은등급:3.0, 중간등급:6.0, 높은등급: 10.0)

S-N 선도는 재료별로 실험을 통해 정해지는데 DNV-RP-C203의 S-N곡선은 다음과 같으며, 부재의 기하학적 형상, 변동응력의 방향, 조립방법에 따라 B1, B2, C1, C등으로 구분 할 수 있다.

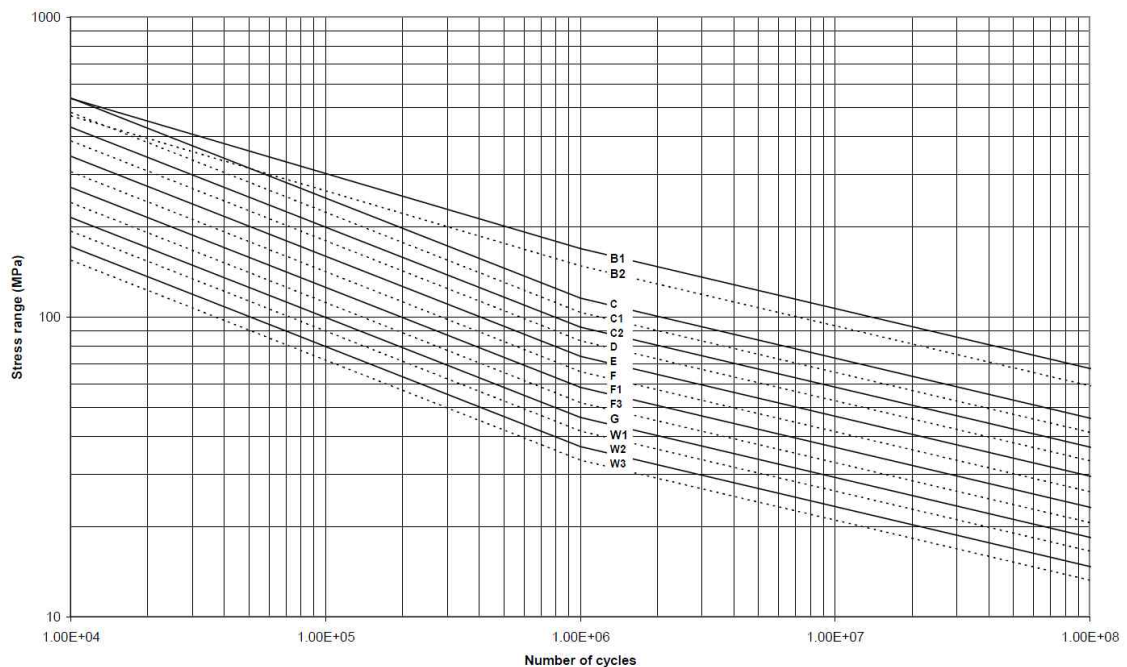


그림. 바다 환경에 있는 Cathodic Protection이 되어있는 재료의 S-N 선도

위 S-N 선도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\log N = \log \bar{a} - m \log \Delta \sigma$$

여기서, N : 파괴 응력 변동폭 $\Delta\sigma$ 에서의 싸이클 횟수

$\Delta\sigma$: 응력 변동폭

m : S-N 선도상에서 기울기

$\log \bar{a}$: S-N 선도상에서의 y축 절편값

최종적으로 Miner's rule을 적용하면 피로 파괴 지수는 다음과 같다.

$$D = \sum_{n=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

마. 라이저 거동에 따른 피로수명 분석

Rainflow Counting 방법을 이용하여 응력 변동 횟수를 산정하고 Miner's 법칙을 이용한 피로 지수는 다음 그림과 같다. 다음 그림은 라이저의 각 위치별 피로 지수를 표현한 것이다. Touch Down Zone 인 플랫폼으로부터 1000m 떨어진 지점에서 피로 손상지수가 집중되는 것을 확인할 수 있었으며, 환경하중조건이 커질수록 피로 지수도 증가함을 확인 할 수 있었다.

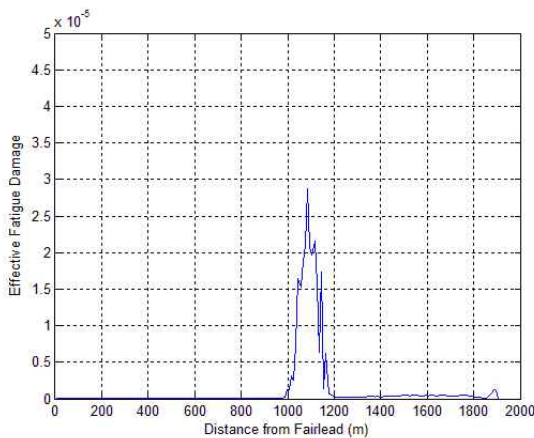


그림. 100년 주기 허리케인 조건일 때의
피로수명

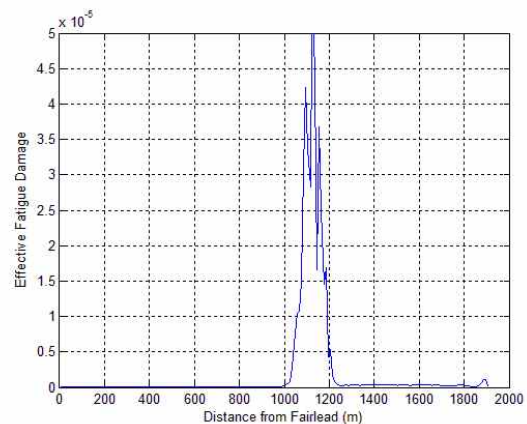


그림. 200년 주기 허리케인 조건일 때의
피로수명

바. 라이저 건전도 모니터링 배경 기술

교량, 사면, 터널과 같은 토목구조물에서는 다양한 계측시스템이 설치되어 있으며 이를 통해서 구조물의 건전도 모니터링과 유지관리를 위한 시스템이 구축되어 운영되고 있다. 다양한 건전도모니터링 시스템 중 교량에 대한 건전도 모니터링 기술개발이 가장 활발히 진행되고 있다고 할 수 있다. 현재 개발되고 연구되고 있는 모니터링 기법은 매우 다양하다. 가장 기초적인 단계의 설계기준치와 측정치를 비교하는 기법, 구조물에서 측정된 고유진동수를 이

용하여 구조해석 모델을 업데이트하여 정밀한 해석 모델을 획득하는 방법, 진동 기반의 손상 모니터링(허광희 등 2004, 조수진 등 2007), 임피던스를 이용한 구조물 손상 모니터링등 매우 다양한 기법과 장비들이 현재 개발되고 연구 되고 있다. 이러한 기법들을 크게 구조물 건전도 모니터링기술은 크게 전역적기법과 국부적기법으로 분류할 수 있으며 다음 표와 같다.

전역적기법(Global response monitoring)은 주로 가속도계, 변위계, GNSS와 같은 센서를 이용하여 구조물 가속도, 변위, 고유주파수의 응답을 측정한다. 이러한 구조물 응답은 저주파 대역의 반응특징을 지니고 있다. 그래서 이러한 측정 반응은 구조물의 전체계 거동 해석에 유리하지만 국부적인 손상을 감지하는 것은 어려운 일이다. 그 이유는 국부적인 손상의 경우 고주파대역의 반응 특징을 나타내기 때문이다. 그래서 이와 같이 국부적인 손상을 모니터링 하기 위해서는 변형율계, 임피던스, 레이저파와 같은 국부적인 거동을 측정할 수 있는 센서를 활용해 이를 평가해야하나 이 역시 센서가 측정할 수 있는 구조물의 범위와 센서 부착 개수에 제한이 있기 때문에 전체 구조물에 활용하기엔 무리가 따른다. 그래서 이러한 두 가지의 모니터링 기법을 융합한 기술이 필요로 하며, 모니터링 목적에 적합한 센서와 그에 따른 처리 기술 개발을 필요로 한다.

표. 토목 구조물의 전역적·국부적 건전도 모니터링 기법 비교

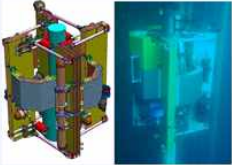
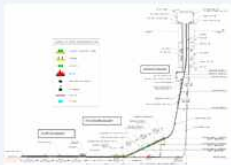
Global response monitoring		Local response monitoring
Acceleration Deflection Frequency	Measurement responses	Strain Impedance Guided waves
Accelerometer GNSS	Sensors	Optical fiber sensors Piezoelectric sensors Laser interferometer
Low frequency responses		High frequency responses
Applicable to Global Behavior Insensitive to Structural Damage	Characteristics	Applicable to Critical Members Limited Sensing Range

위와 같이 토목구조물의 건전도 모니터링을 위해서 다양한 기술들의 개발이 이루어지고 있으며, 다양한 센서가 개발되고 있다. 하지만 본 연구가 목표로 하는 라이저의 건전도 모니터링을 위해서는 라이저에 특화된 기술이 필요로 하다. 라이저의 경우 토목 구조물과는 달리 길이가 매우 길고 세장한 파이프이다. 구조물의 손상평가는 구조물의 강성변화를 통해 구조물의 건전성을 모니터링하고 있으나, 라이저의 기하학적 특징으로 인해서 강성을 통한 모니터링은 매우 어려우며 특히 SCR(Steel Catenary Riser)의 경우 TDZ(Touch Down Zone)에서 상부 부유체의 거동에 따라 접촉 조건이 비선형적 거동을 함에 따라 움직임 만으로도 강성이 변화한다. 또한 수중이라는 조건으로 인해서 위성 신호를 수신하여 위치를 측정하는

GNSS시스템과 레이저 변위계와 같이 특별한 기준점을 필요로하는 센서의 경우 수중에서의 활용이 불가능하다. 라이저에 대한 모니터링을 분류해 보면 다음 표와 같다.

라이저의 건전도를 감시하기 위한 건전도 모니터링 기술 또한 크게 국부적 기법과 전역적 기법으로 구분 할 수 있다. 국부적기법은 육안검사, Ultrasonic, Radiography, Electromagnetic, Magnetic Flux leakage등을 장비 및 기법을 활용하여 직관적으로 이상부위를 확인하는 방법이다. 이 방법은 매우 직관적이기 때문에 손상과 이상 부위를 직접적으로 찾아 낼 수 있지만 실시간 모니터링은 불가능하며 피로수명분석과 같이 장기거동 모니터링은 불가능하다는 단점이 있다. 또한 장비를 운용하기 위해서는 막대한 비용이 소모된다. 반면에 전역적 기법은 가속도, 변형율, 기울기와 같은 구조적 거동 데이터를 이용하는 방법으로 취약부위 및 장기거동 변화예측이 가능한 기법이다. 하지만 앞서 언급하였 듯, 높은 수준의 구조해석 처리 기술을 필요로 하고 센서 설치 위치 및 측정 정밀도 확보와 같은 현재 기술의 한계가 있으므로 이러한 한계를 극복하는 것이 핵심기술이라고 할 수 있다.

표. 라이저의 전역적·국부적 건전도 모니터링 기법 비교

Local Method (Conventional Method)		Global Method (Research in Progress)
Visual inspection Ultrasonic Radiography Electromagnetic Magnetic Flux Leakage	Measurement Method	Displacement Strain Acceleration Inclination
	Measurement Example	
Directly finds the damage	Strengths	Long term behavior monitoring Fatigue Lift time monitoring
Long term behavior monitoring Fatigue Lift time monitoring High Cost	Weaknesses	Sensor installation and techniques Data processing

현재 국내에서는 수직 라이저에 대한 모니터링 기법에 대한 연구가 수행중이다. 유용 외(2014)연구에서는 수직라이저를 대상으로 가속도 신호를 이용한 손상 탐지에 관한 연구가 수행된바 있으나, 수직라이저에 한정된 기법이라는 한계가 있다. 국외의 경우 라이저 모니터링에 관한 연구가 현재 수행중인데 Constatinieds 외(2011)의 연구에서는 3축가속도계와 2축경사계를 이용한 모션보틀(Motion Bottle)를 개발하여 라이저에 부착하는 연구를 수행하였으나, 측정된 데이터와 해석 모델간의 데이터비교에 그쳐 직접적인 모니터링에 대한 연구는 수행되지 않았다. 최근에는 RPSEA 연구프로젝트의 일환으로 드릴링 라이저에 대한 모니터링 연구가 수행되었다. 라이저에 변형률계를 부착하고 3축 가속도계, 2축 경사계가 포함된 모션보틀을 설치하여 가속도계와 라이저의 곡률의 상관관계를 도출하여 라이저의 피로 수명을 계산하였다.

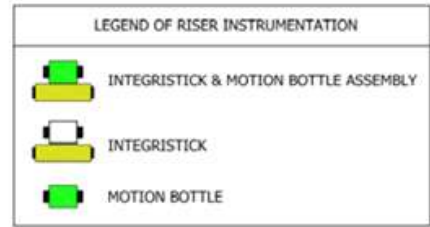


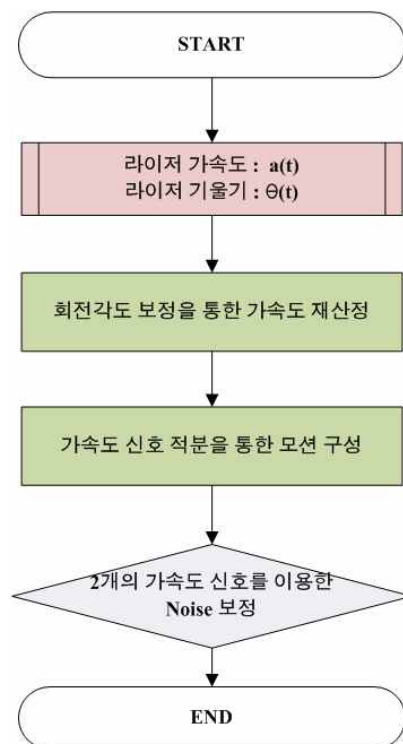
Diagram illustrating a riser system for offshore drilling. The system includes a vessel at the surface, a riser cable, and a receiver. The riser cable is instrumented with various sensors and components, as detailed in the inset box:

- Motion Sensors
- Electronics
- Battery Pack
- RFID
- Modem

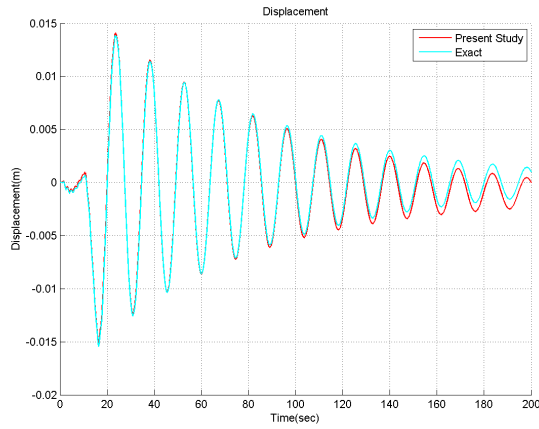
– 34 –

사. 모션 추정 알고리즘 개발

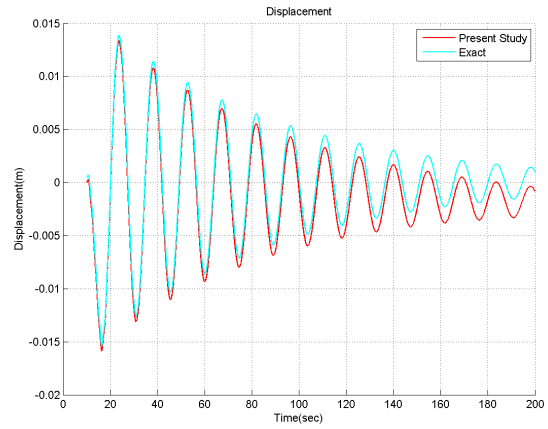
본 연구에서는 라이저를 모니터링 하는 기존 기술들과는 차별화 된 기술을 개발 하였다. 본 연구에서는 라이저의 모션을 모니터링 하기 위해서 가속도계와 기울기계를 융합하는 알고리즘을 개발 하였다. 기본적으로 가속도신호를 이중적분하게 되면 움직임을 계산 할 수 있다. 하지만 노이즈와 초기속도에 대한 오차가 증폭되어 오랜시간 적분하게 되면 발산하거나 오차가 지배적인 데이터가 도출되게 된다. 기존의 연구에서는 가속도 신호 자체를 필터링하여 오차를 줄이는 방향으로 접근을 하였다. 하지만 가속도 신호 노이즈를 제거하기 위해서 주로 활용하는 방법은 주파수 대역 필터링기법을 사용한다. 주파수 대역 필터링 같은 경우 특정 주파수를 차단하거나, 통과 시키거나 하는 기법을 활용하는데 이는 관리자가 구조물의 고유진동수를 정확히 알고 있거나 많은 가정사항이 포함되기 때문에 실제 구조물에서는 측정이 거의 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 기존 기술의 한계를 극복하고자 2개의 가속도계와 1개의 기울기계를 융합하여 특별한 데이터 노이즈 처리 기술 없이 모션 추정이 가능한 기술을 개발하고자 하였으며, 알고리즘의 flow chart는 다음 그림과 같다.



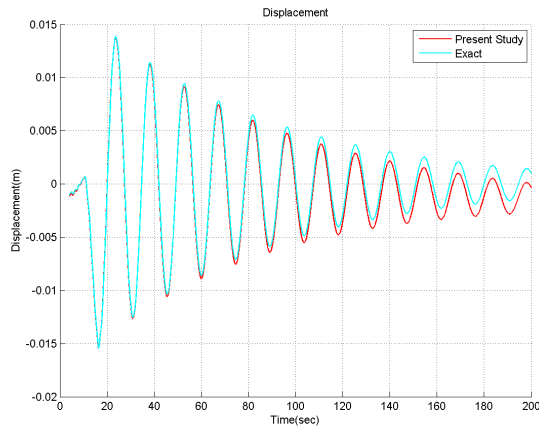
모션 추정 알고리즘을 이용한 모션 추정결과의 오차를 비교 하였다. 우선 단순보 모델로 검증을 실시하였다. 가속도 신호는 노이즈가 없을 경우로 가정하였으며, case 1,2,3,4는 각각 초기속도가 다를 경우이다. 초기 속도에 오차가 존재할 경우 추정 변위는 발산을 하게 되어 오차가 증폭되는 효과가 나타난다. 다음 그림은 단순보 모델의 중앙부 변위를 추정한 결과이다.



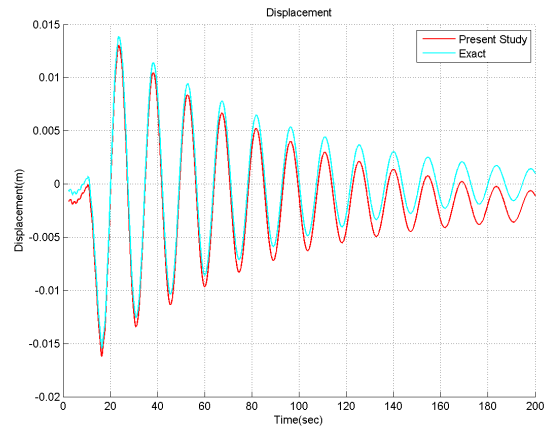
a) Case 1



b) Case 2



c) Case 3



d) Case 4

그림. 시간에 따른 모션 추정 계산 결과

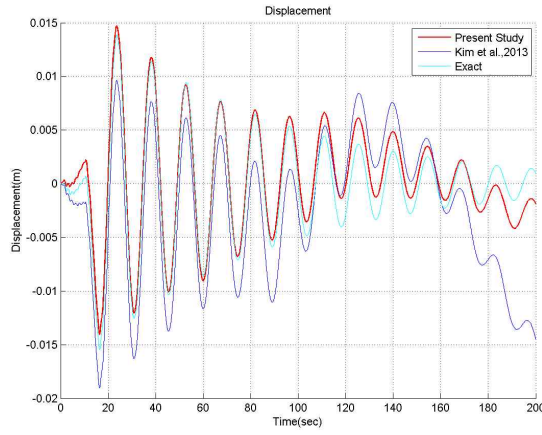
표. 서로 다른 초기 속도에 따른 모션 추정 MCC 비교

Case Number	MCC
1	0.9898
2	0.9486
3	0.9780
4	0.9222
Average	0.96

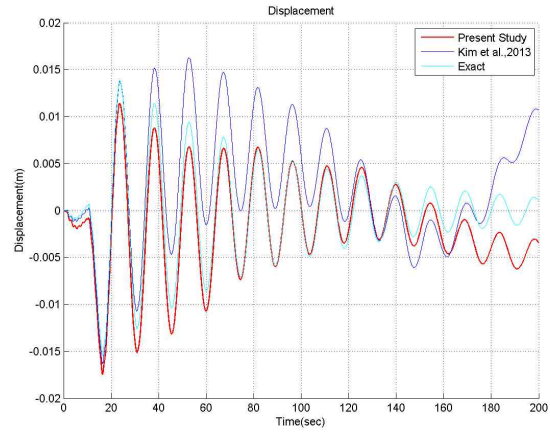
개발된 모션 추정 알고리즘의 프로토타입을 검증한 결과 MCC값이 실제 모션 형상과의 일치성이 0.96으로 나타났다. MCC값은 1일 경우 비교대상과 비교 기준값이 완전히 일치한다는 것을 뜻하며, MCC값이 작아질수록 두 개의 비교대상의 차이가 매우 크다는 것을 의미한다. 비교결과 평균으로 4%이내, 최대 8%오차 이내의 정밀도를 확보 할 수 있었다.

개발된 모션 추정 알고리즘의 계측 노이즈에 따른 모션 추정 정밀도를 비교연구 하였다. 본 연구에서 사용된 노이즈는 백색잡음(white noise)로 고주파 잡음이나 저주파 같은 잡음의

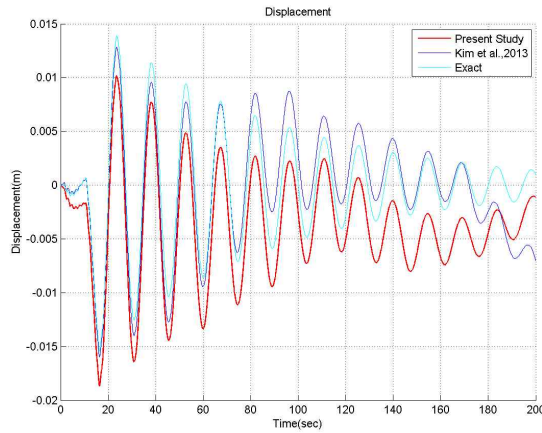
경우 주파수 대역 필터링 기법을 통해 어느 정도 필터링이 가능하지만 백색잡음의 경우는 전 주파수 대역에 걸쳐 고루 작용하는 노이즈 이므로 필터링이 까다롭다. 그래서 본 연구에서는 백색잡음을 각각 최대 가속도의 2%와 5%일 때를 가정하여 기존연구와 정밀도 비교 연구를 수행하였다.



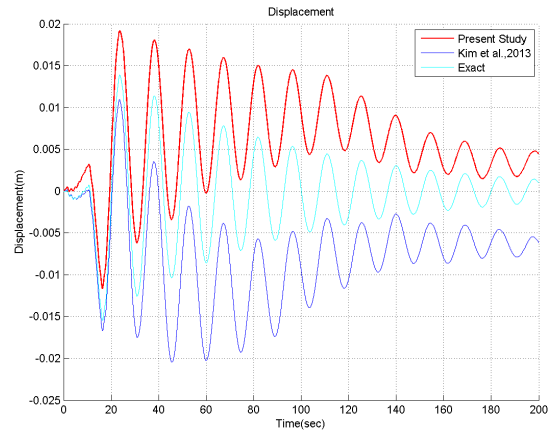
a) Case 1



b) Case 2



c) Case 3

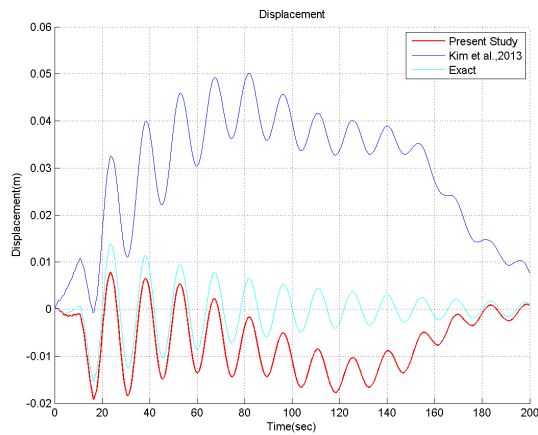


d) Case 4

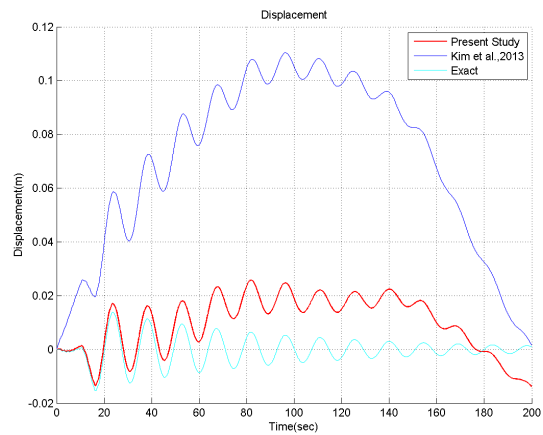
그림. 백색잡음 평균 크기가 최대가속도의 2%일 경우 모션 비교

표. 백색잡음 평균 크기가 최대가속도의 2%일 경우 MCC 비교

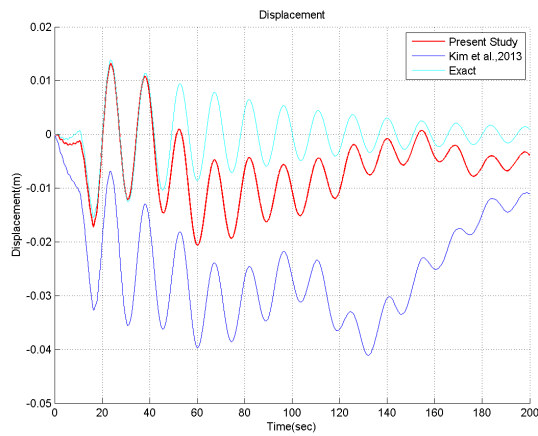
Case Number	MCC	
	개발 기술	기존 연구
1	0.9208	0.5047
2	0.8368	0.5374
3	0.6322	0.8139
4	0.3455	0.2750
Average	0.80	0.62



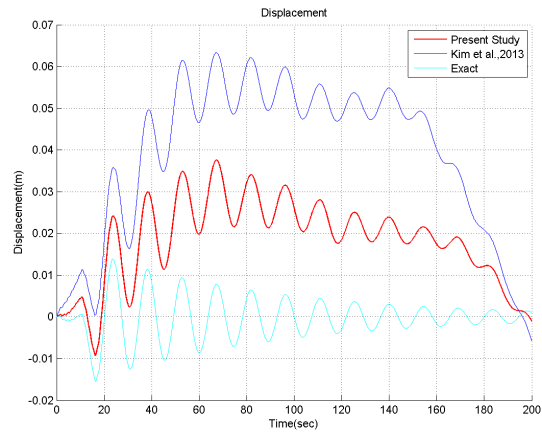
a) Case 1



b) Case 2



c) Case 3



d) Case 4

그림. 백색잡음 평균 크기가 최대가속도의 5%일 경우 모션 비교

표. 백색잡음 평균 크기가 최대가속도의 5%일 경우 MCC 비교

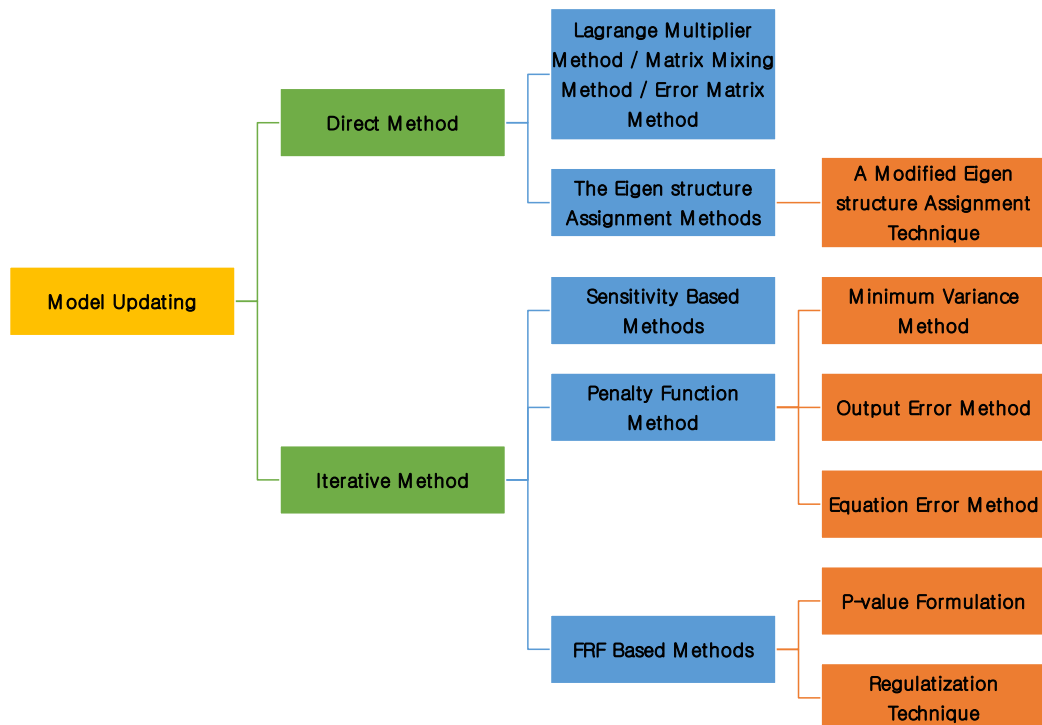
Case Number	MCC	
	개발기술	기존연구
1	0.2868	0.0188
2	0.1135	0.0021
3	0.3384	0.0447
4	0.0511	0.0101
Average	0.25	0.02

본 연구에서는 개발된 모션 추정 알고리즘의 계측 노이즈에 따른 모션 추정 정밀도를 비교연구 결과 2%의 백색잡음이 노이즈로 포함되어 있는 경우 개발기술의 MCC는 0.80, 기

존기술은 0.62로 개발기술의 정밀도가 30%이상 향상되었으며, 5%의 백색잡음이 노이즈로 포함되어 있을 경우 개발기술의 MMC는 0.25, 기존연구는 0.02로 10배 이상의 정밀도 향상 효과를 나타내었다. 현재까지의 변위 추정기술들은 데이터 필터링 과정을 필요로 하거나 구조해석모델을 필요로 한다. 데이터 처리자가 사전 지식을 통해 필터링을 위한 변수들을 조정하고 시행착오로 결정하는 과정을 거친다. 이러한 과정은 광범위하게 사용 될 수 없고 특정 상황에만 적용될 수 있어서 기존 기술에서의 모션 추정 정밀도를 향상 시키는데는 한계가 있었다. 본 연구에서 개발한 알고리즘이 노이즈가 증가 할수록 실제값과 오차가 존재하지만, 노이즈가 증가 할수록 기존 기술 대비 정밀도향상 폭이 증가하여 5%노이즈의 경우 정밀도를 10배 이상 향상 시켜 매우 의미 있는 결과를 도출하였다.

아. 모델 업데이트 기법

시스템규명기법은 입력과 출력을 기본정보로 시스템, 즉 구조물의 강성 및 질량행렬을 추정하는 방법을 말한다. 일반적으로 시스템규명기법은 기준모델이 되는 해석모델을 기반으로 수치해석 결과와 실제 구조물의 응답결과를 비교, 평가하여 구조물의 강성과 질량을 추정한다. 만약 기준이 되는 해석모델이 실제 구조물의 거동을 정확히 표현할 수 없다면 정확한 시스템규명은 불가능하다. 따라서 실제 구조물의 거동을 정확히 표현할 수 있는 해석모델의 작성 이 매우 중요한데, 정확한 해석모델을 만들기 위한 적극적인 방법이 바로 모델개선기법이다. 모델 개선기법은 시스템규명기법의 한 분야로서 실험결과를 기초로 해석결과와의 오차를 최소화시킴으로써 해석모델의 강성, 질량 등의 시스템 변수를 보정하여 해석모델을 개선하는 과정을 말한다. Rad(1997)는 모델개선기법을 다음과 같이 분류하였다.



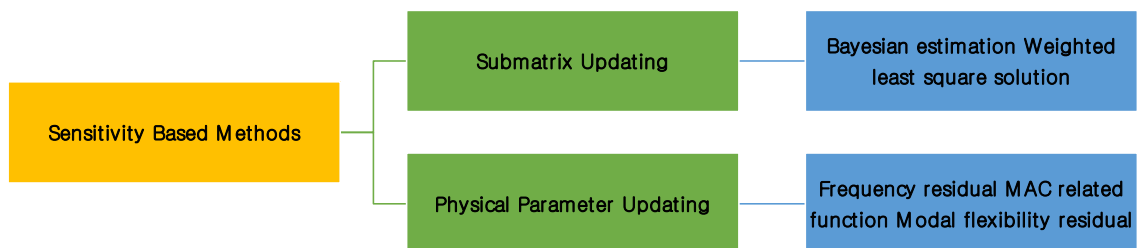
- 직접법에 의한 유한요소모델 개선

직접법은 측정에 의해 구해진 불완전한 고유진동수와 모드형상을 사용하여 해석 모델을 직접적으로 보정하기 위한 방법이다. 이 방법들은 최적화 이론에 기초하여 시스템행렬들에 대한 제약조건을 갖는 목적함수를 최소화함으로써 시스템행렬을 개선한다. 또한 개선하고자 하는 질량 또는 강성행렬에 대한 closed-form solution을 제공한다. Rad(1997)는 직접법의 장·단점을 다음과 같이 설명하였다.

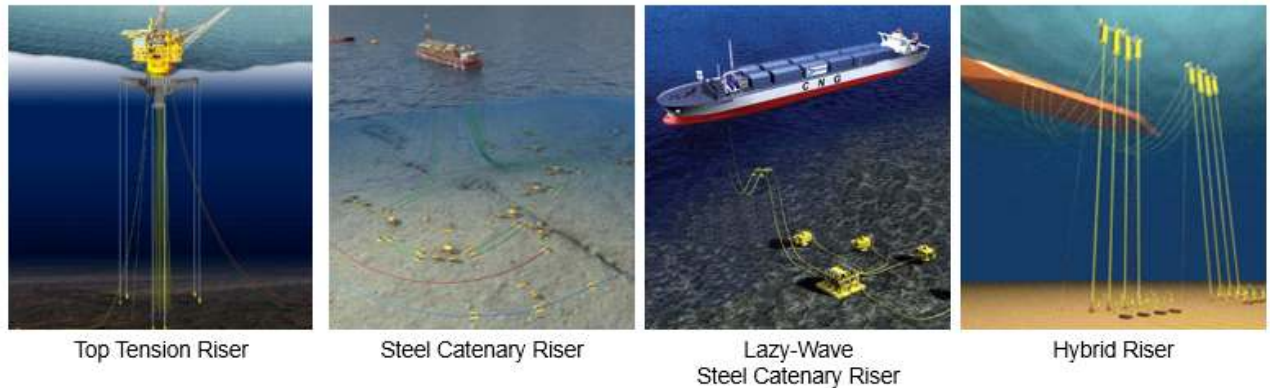
- 장점
 - 반복계산이 필요하지 않기 때문에 항상 수렴한다.
 - 계산시간이 반복법보다 매우 적게 걸린다.
 - 정해에 가까운 기준데이터를 제공한다.
- 단점
 - 측정자료와 모달 해석이 정확하여야 한다.
 - 모드형상이 유한요소모델의 크기에 맞게 확장되어야 한다.
 - 일반적으로 구조물의 연결성을 유지하기가 어렵고 개선된 행렬이 보통 조밀하다.
 - 개선된 질량과 강성행렬에 대한 양한정성(positive definiteness)을 보장하지 못한다.

- 반복법에 의한 유한요소모델개선

직접법의 문제점을 개선하고 보다 더 정확한 모델개선을 위해 반복해석을 통해 시스템행렬을 개선하고자 한 방법이 반복법이다. 반복법은 주로 Adelman과 Haftka(1986), Friswell과 Penny(1990, 1992), Friswell과 Mottershead(1995), Maia와 Silva(1997), Link(1999), Thonon과 Golinval(2003), 그리고 Jaishi와 Ren(2005) 등에 의해 연구되었다. 반복법은 크게 업데이트 변수의 민감도에 기초한 민감도기법과 구조물의 주파수응답함수를 이용한 방법으로 나눌 수 있다. 다음 그림은 민감도기법에 의한 모델개선기법을 분류하였다.



자원의 분포에 따라 결정 된다. 다음 그림은 다양한 라이저의 형상을 나타내고 있다.



라이저의 끝단은 해저면에 고정되어 있고 다른 끝단은 배와 같은 플랫폼에 연결되어 있다. 라이저의 거동을 정확히 이해하기 위해서는 우선 라이저의 거동에 영향을 끼치는 지배인자들을 정의 해야한다. 라이저의 거동에 영향을 미치는 주요 인자는 다음과 같다.

- ① Vessel Induced Motion(VIM)
- ② Vortex Induced Vibration(VIV)
- ③ Touch Down Zone(TDZ)
- ④ Flow Line bucking

주요 인자에 대한 설명은 다음과 같으며, VIM, VIV의 경우 수직 라이저와 현수선 라이저 모두에 적용되며, Touch Down Zone과 Flow Line Buckling는 현수선 라이저에만 적용된다.

① Vessel Induced Motion(VIM)

상부 플랫폼의 움직임으로 인해서 발생하는 라이저의 거동을 VIM이라고 한다. 상부 플랫폼은 파도, 바람에 의해서 시간에 따라 움직이며 플랫폼의 종류에 따라 몇 m내에서 움직이기도 한다. 상부 플랫폼의 움직임이 증가하게 되면 라이저의 파손을 유발 할 수 있기 때문에 일반적으로 라이저 설계 시 다음을 기준으로 플랫폼의 움직임을 설계한다.

일반적인 상황일 때 수심의 3% 이내의 플랫폼 움직임을 허용하며, 극한 조건일 경우 수심의 5% 이내의 플랫폼 움직임을 허용한다.

② Vortex Induced Vibration(VIV)

라이저는 수심에 따라서 길이가 최대 수천 m 까지 이다. 파도와 바람은 얕은 수심에만 영향을 미치고 수심이 깊어질수록 라이저는 조류에 의한 하중을 받는다. 조류가 라이저에 작용하면서 와류가 발생하게 된다. 마치 건물에 바람이 불 때 건물 뒷면에 와류가 발생 하는 것과 같은 동일한 원리이다. 이러한 와류가 발생하게 되면 진동이 발생하게 되고 이러한 진동은 라이저의 피로 수명을 단축시키게 된다.

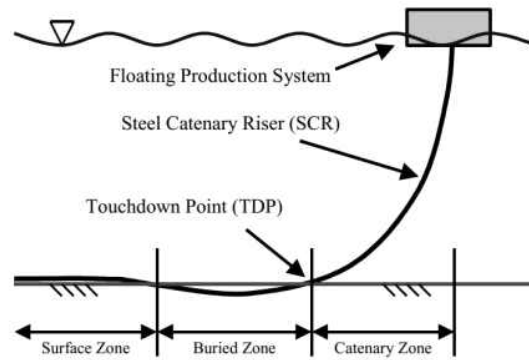


그림. 일반적인 현수선 라이저의 형상((Bridge et al, 2003)

③ Touch Down Zone(TDZ)

위 그림과 같이 현수선 라이저(Catenary Riser)는 포물선 형태의 라이저이기 때문에 플랫폼의 움직임과 라이저의 거동에 따라서 라이저의 일부가 해저면에 붙었다가 떨어졌다는 반복하게 된다. 이와 같이 라이저가 해저면에 붙었다 떨어졌다는 구간을 TDZ이라고 한다. 이러한 구간은 결국 라이저의 경계조건이 변화하는 것을 의미한다. 이러한 경계조건의 변화는 라이저의 거동이 비선형 거동을 나타냄을 의미한다.

④ Flow Line bucking

현수선 라이저의 경우 TDZ에서부터 라이저 끝단까지 라이저는 해저면에 놓여있게 되며 이 부분을 Flow Line라고 한다. 이때 이 부분은 축력으로 인해서 좌굴이 일어날 수도 있는데 이러한 현상을 Flow Line Buckling이라고 한다.

라이저를 올바르게 모니터링 하기 위해서는 이러한 라이저의 거동 특성을 반영한 모니터링 기술이 필요하다. 모니터링 기술도 또한 수직 라이저와 현수선 라이저 기술로 구분할 수 있다. 수직라이저나 현수선 라이저를 모니터링 하기 위한 센서는 다음과 같은 장비가 널리 사용된다. INTEGRipod의 경우 라이저의 각속도와 가속도를 동시에 측정이 가능하다. 측정된 데이터는 케이블로 플랫폼의 DAQ와 연결되거나 수중 음파 통신 기술을 이용하여 측정된 데이터가 무선으로 전송될 수 있다. 또한 자체 메모리 기능을 내장하여 측정된 데이터를 저장한다. 이러한 DAQ 전송기능은 작업 환경에 따라 달라지게 된다.



	Resolution	Range
3-axis Acceleration	0.001g	$\pm 1.2g$
2-axis Angular rate	$\pm 0.01 \text{ deg/s}$	$\pm 10 \text{ deg/s}$
1 axis Inclination	$\pm 0.01 \text{ deg/s}$	$\pm 10 \text{ deg/s}$

INTEGRipod motion sensor specification

(Karayaka et al., Steel Catenary Riser Response Characterization with On-line Monitoring Devices, 2009)

그림. 라이저 모니터링 센서

하지만 앞서 서술하였듯 수직 라이저와 현수선 라이저의 거동은 매우 차이를 보인다. 두 라이저 모두 VIM과 VIV에 영향을 받지만 현수선 라이저의 경우는 TDZ의 거동까지 고려해야 한다. 구조물의 거동을 모니터링 하는데 있어서 VIV의 경우는 단순히 선형적인 문제로 접근이 가능하다.(Wei et al, 2009, Mcneill et al, 2011, Kluk et al, 2013,) VIV에 의한 라이저의 모션을 모니터링하기 위해서는 모드 해석법으로 접근하여 라이저의 거동을 분석한다. 하지만 VIM의 경우는 라이저의 경우에는 경계조건의 위치가 변화하며 또한 대변위가 발생하기 때문에 VIM의 경우는 비선형 거동 해석 기술을 포함해야 한다.

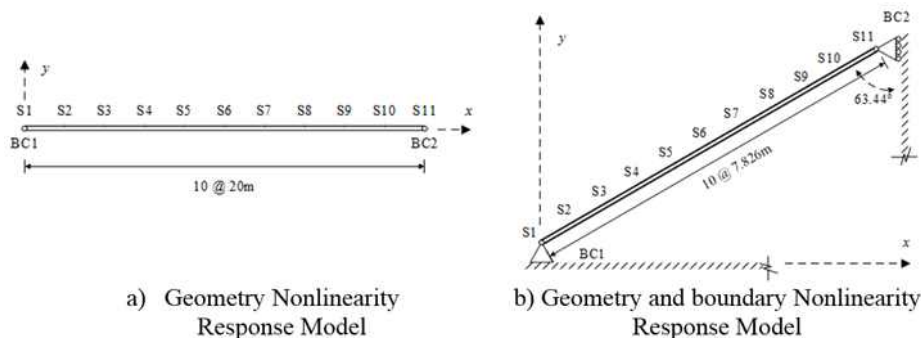
이와 같은 라이저의 거동 특징을 모사하기 위해서 본 연구에서는 비선형 해석 모델을 구축하였다.

라이저의 거동 특성을 모사하기 위해서 비선형 해석 모델 범위하게 을 구축하였다. 구조물의 비선형성은 다음과 같이 3가지로 구분할 수 있다.

- ① 재료비선형(Material Nonlinearity)
- ② 기하비선형(Geometry Nonlinearity)
- ③ 경계비선형(Boundary Nonlinearity)

라이저의 경우 매우 유연한 구조물이고 상부 플랫폼의 허용 움직임 범위가 매우 크기 때문에 기하 비선형성을 고려해야한다. 또한 현수선 라이저의 경우 라이저 거동에 따라 TDZ에서의 경계 조건의 위치가 변화하므로 경계 비선형성을 고려해야한다. 이와 같은 비선형적 거동을 고려하기 위해서 다양한 경계조건모델을 구축하였다.

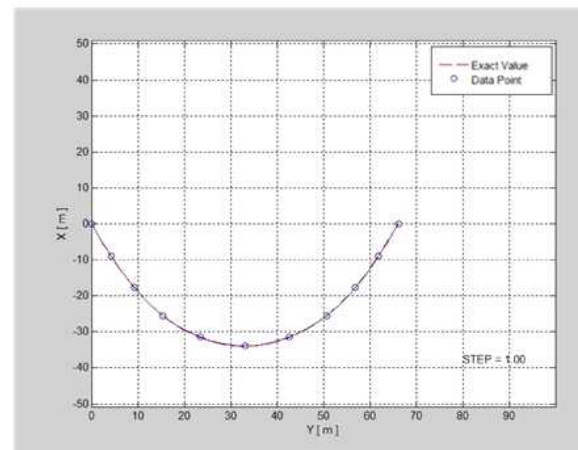
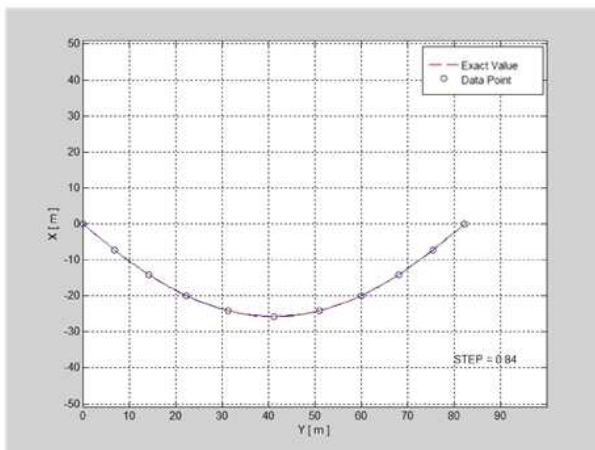
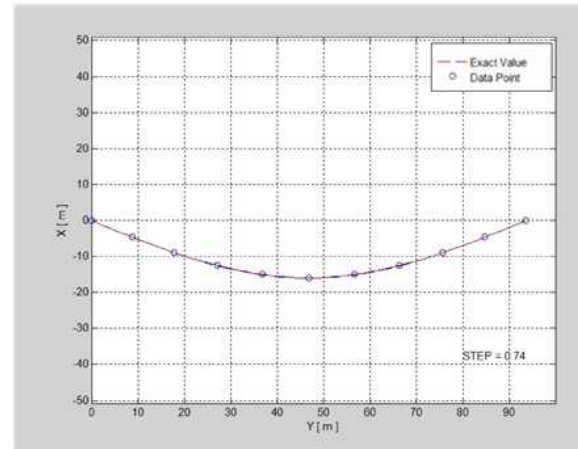
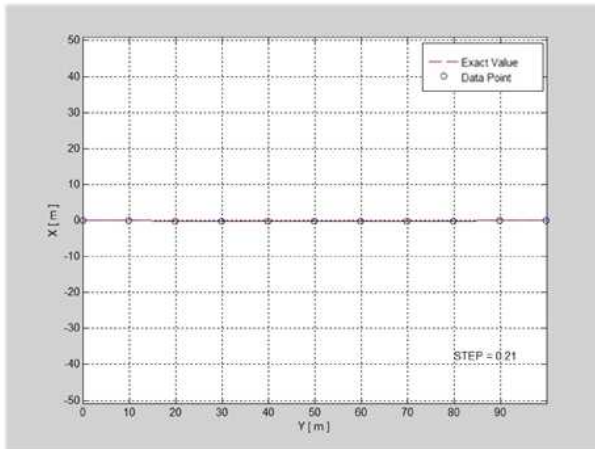
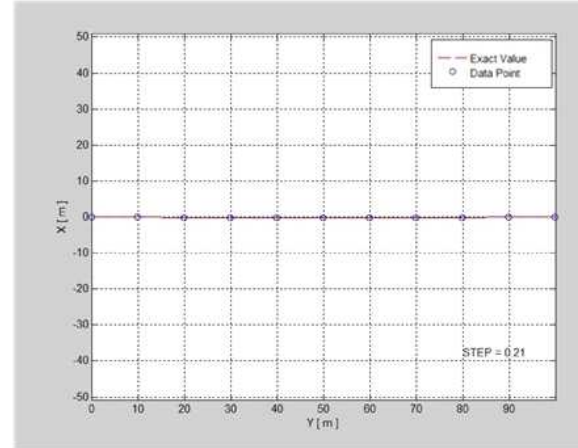
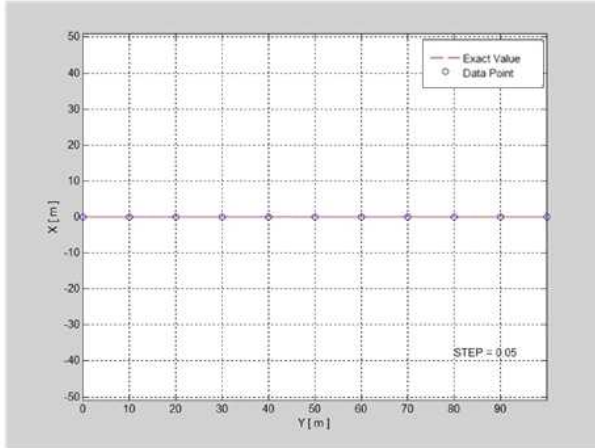
해석을 위해서는 ABAQUS를 이용하였으며, 2D Beam 요소를 사용하여 구현하였다. 각각 모델은 101개의 절점과 100개의 요소로 구성되어 있다. 비선형 해석을 위해 작용하중을 증분하여 적용 시켰으며, 각각의 증분된 하중은 STEP으로 표현하였다



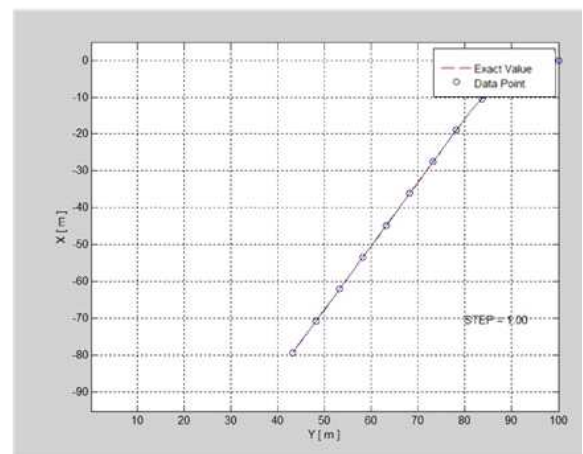
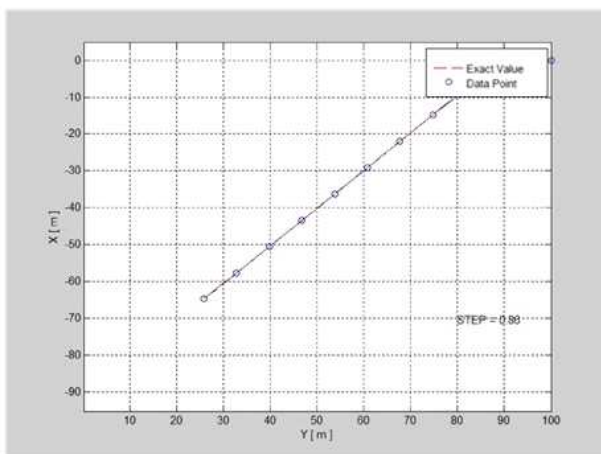
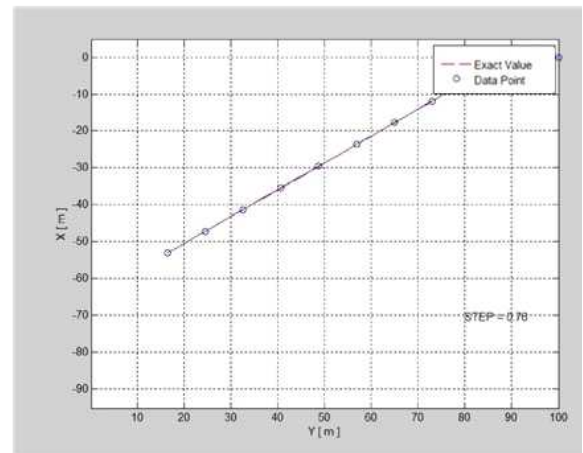
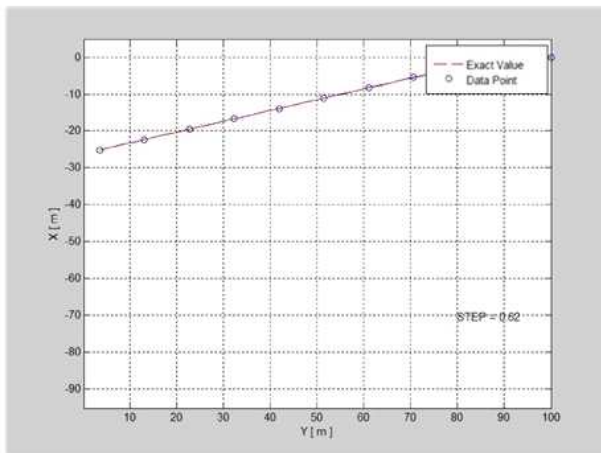
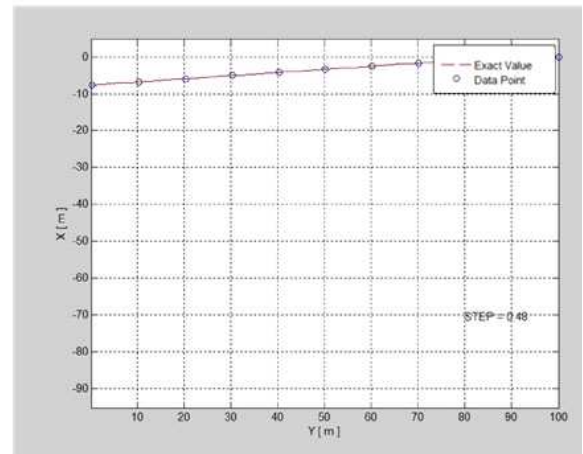
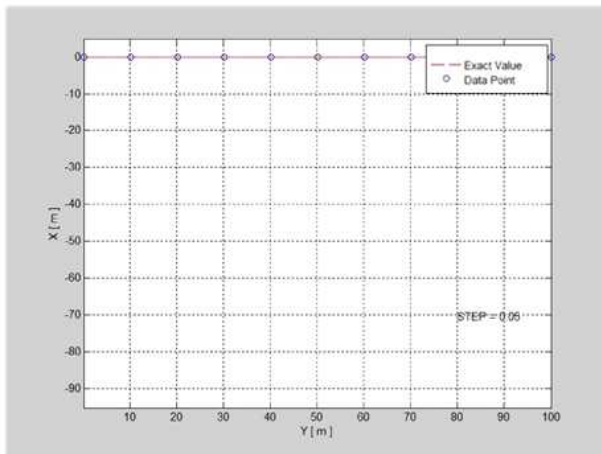
위 그림과 같이 기하비선형 모델과 기하비선형, 경계 비선형 모델을 선정하였다. 각각의 경계 조건은 다음 표와 같다.

Case	Nonlinear Analysis	Boundary Condition	
		BC 1	BC 2
G-HR	Geometry	Hinge	Roller
G-FFI		Free	Fix
G-HFR		Hinge	Fixed Roller
GB-HR	Geometry + Boundary	Hinge	Vertical Roller

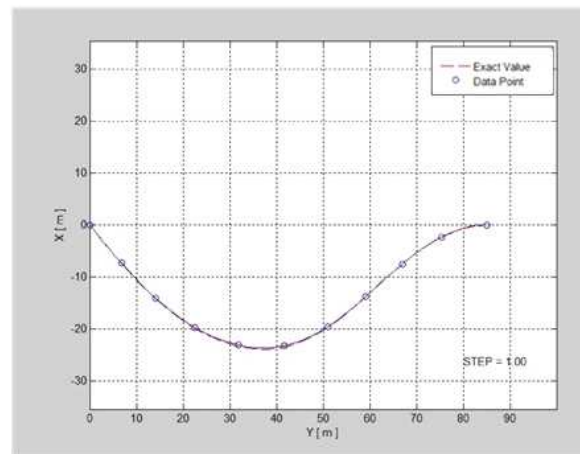
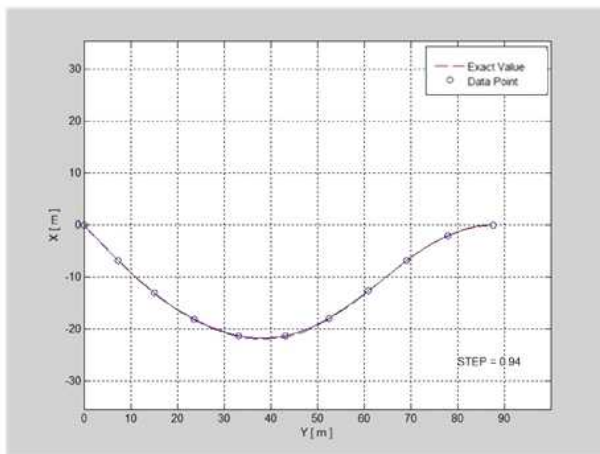
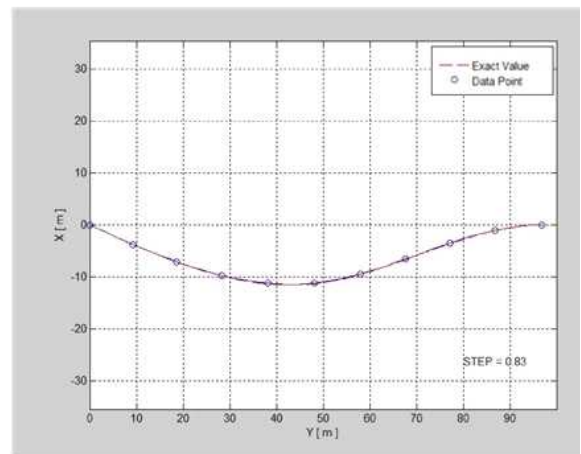
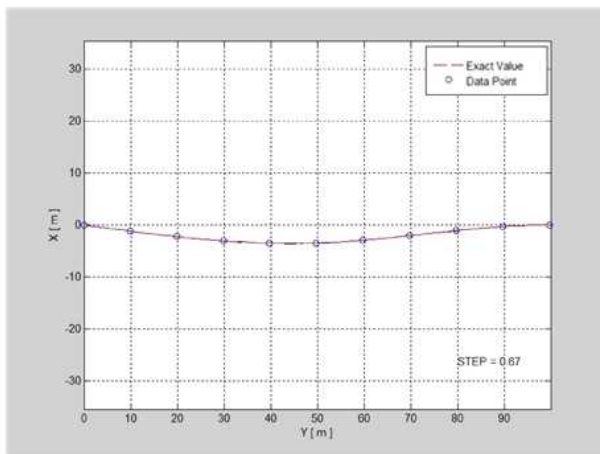
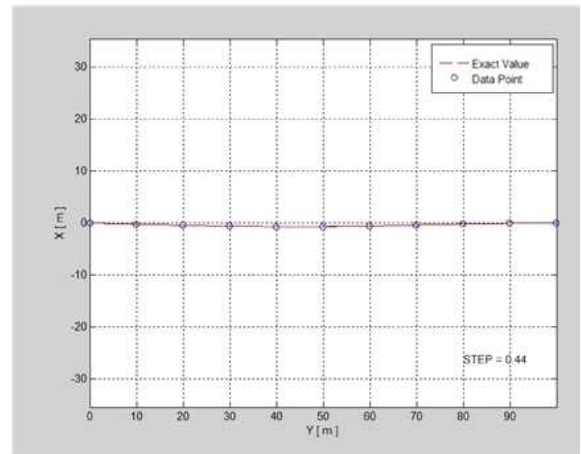
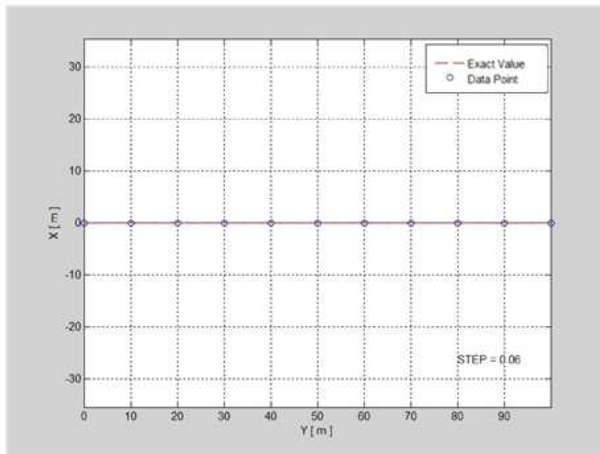
다음 그림은 시간에 따른 각 해석 모델의 변형형상이다.



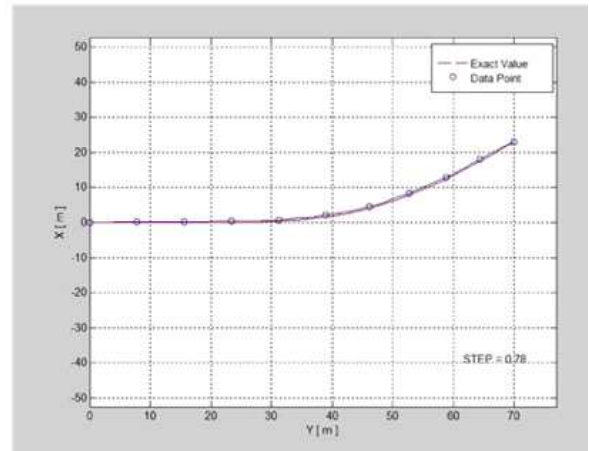
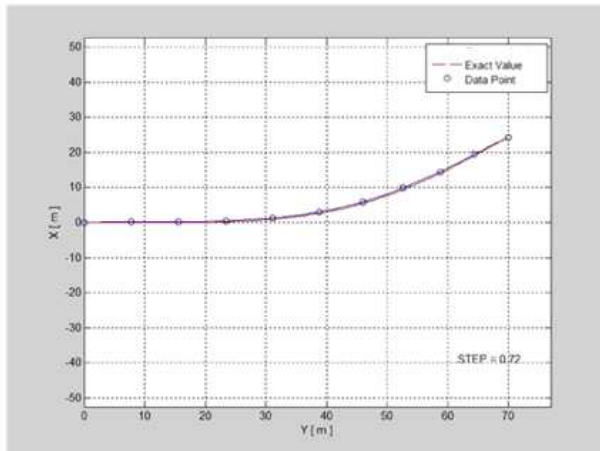
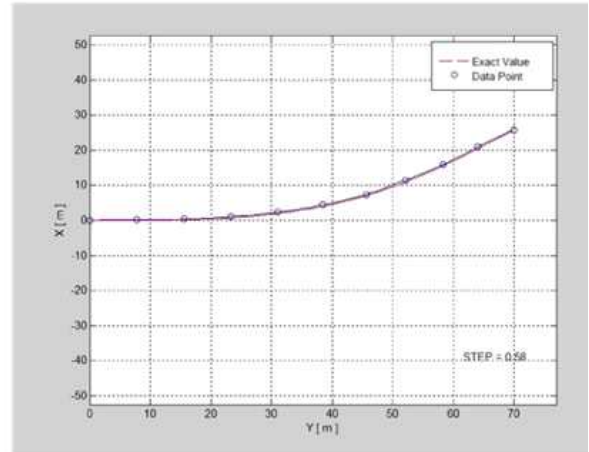
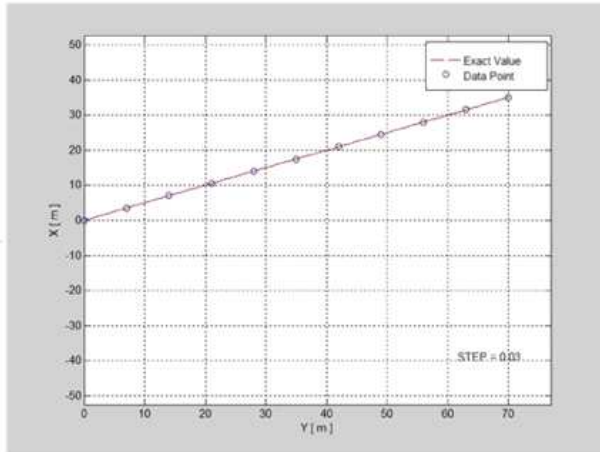
G-HR 변형 형상



G-FFI 변형 형상



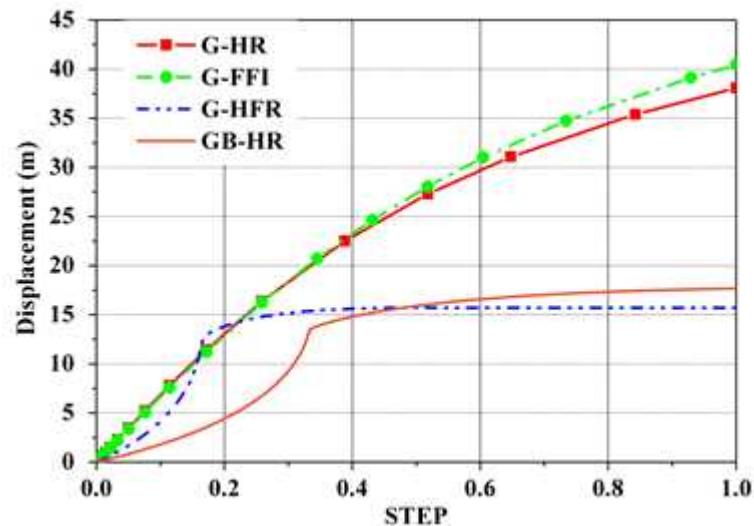
G-HFR 변형 형상



G-HFR 변형 형상

라이저의 비선형적 거동을 모사하기 위해서 총 4가지의 해석 모델을 대상으로 데이터베이스를 구축하였다. 해석 모델별로 변위, 가속도, 회전각 데이터를 구축하였다. 다음 그림은 각 해석 모델에 따른 Step에 따른 S6 지점 변위를 도식화 한 것이다. 다음 그림에서 확인할 수 있듯이 비선형 거동을 확인 할 수 있으며, GB-GR의 경우 step 0.35를 기준으로 변위 응답

이 급변하는 모습을 확인 할 수 있는데 이는 모델의 과대 변형이 발생하여 Step 0.35순간에 바닥면에 접촉하고 그 이후부터는 접촉 비선형성이 나타나기 때문이다. 이는 현수선 라이저의 Touch Down Zone의 거동 양상을 모사한다. G-HR, G-FFI, G-HFR의 경우 다양한 경계 조건에서의 거동을 모사하여 수직 라이저의 거동양상을 대표할 수 있다. 이를 통해 라이저의 거동을 구현 할 수 있는 해석적 모델을 구축하였다.



차. 모션 데이터를 이용한 내력 해석 기술

실제 구조물에서 계측된 데이터로 구조물의 거동을 평가하는데 있어서는 계측 데이터 수의 제약으로 인해 정밀한 해석 모델이 존재한다 하여도 정밀한 해석 결과를 기대하기 어렵다. 계측 대상 구조물은 무한의 절점을 갖는 시스템으로 모델링 될 수 있지만, 실제 계측 모델에서는 변위 측정점이 제한적이므로 계측 변위 정보를 바탕으로 적절히 보간하여 미 계측 절점의 변위성분을 추정하여 구조물의 형상을 추정해야 한다. 정밀한 미 계측 변위의 추정을 위해서는 단순 보간법이 아닌, 보다 합리적이고 엄밀한 구조형상의 추정 기법이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 유한요소 해석 모델을 이용하여 구조물이 실제 거동 할 수 있는 여러 형상을 구조형상함수라 정의하였다. 정의된 구조형상함수에 임의의 가중치를 부여하고 이들 형상들을 중첩하여 중첩형상을 도출하였다. 도출된 중첩형상의 변위와 실제 구조물에서 계측된 변위와의 변위 오차를 최소화 하는 목적함수를 구성하였다. 목적함수는 최소제곱법(S.C. Chapra, 2008)을 이용하여 오차를 최소화하였으며, 이를 통해 구조형상함수 가중치를 계산하였다. 계산된 가중치를 각 구조형상함수에 대입하여 최종적으로 계측 변위를 이용한 미 측정 지점의 변위들을 추정하여 구조물 형상을 도출하였다.

-구조 형상 함수(Structural Shape Function)

구조물 유한요소모델을 이용하여 구조물이 실제 거동 할 수 있는 다양한 형상을 구조형상함수라 정의하였다. 구조형상함수는 각 절점의 변위벡터 행렬로 구성된다. 이들 함수는 해석

모델에 다양한 하중 경우를 재하하여 얻은 형상과 자유 진동 해석을 통해 얻은 모드 형상 등 다양한 형상으로 구성할 수 있다. 여러 구조형상함수(Φ_i)에 각각의 가중치(α_i)를 부여하고 이들을 중첩하면 다음 식(1)과 같은 중첩형상 S 를 얻을 수 있다.

$$S = \alpha_1 \Phi_1 + \alpha_2 \Phi_2 + \cdots + \alpha_n \Phi_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Phi_i \quad (1)$$

여기서,

S : 구조형상함수 중첩형상

Φ_i : 구조형상함수

α_i : 구조형상함수 가중치

n : 고려된 구조형상함수의 개수

-목적함수(Object Function)

실제 구조물의 각 지점에서 계측된 변위 데이터를 F_j 라 하고 총 m 개의 계측 개소에서 변위를 계측 하였을 경우 j 는 계측 지점 위치 번호로써 $j=1,2,3,\dots,m$ 이다. 실제 구조물에서 계측된 지점의 변위 F_j 와 이와 동일한 지점에서의 구조형상함수로 중첩된 형상의 변위 오차는 식(2)와 같이 구성할 수 있다.

$$Error = \sum_{j=1}^m (F_j - S_j) \quad (2)$$

식(2)의 변위 오차를 최소화는 구조형상함수 가중치를 산정하기 위해서 최소제곱법(Least Square)을 도입하여 오차 제곱의 합을 최소화 하는 목적함수를 구성하였다. 이를 식(2)에 적용하여 다음 식(3)과 같은 목적함수를 최종적으로 구성하였다.

$$\epsilon = \sum_{j=1}^m (F_j - S_j)^2 \quad (3)$$

-구조형상함수 가중치 계수(Weight Factor)

도출된 목적함수로 각각의 구조형상함수 가중치를 산정하기 위해서 식(3)을 각각의 가중치에 대해서 편미분을 하여 식(4)와 같은 편미분 방정식을 구성하였다. 여기서, $k=1,2,3,\dots,n$ 이다.

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha_k} = 2 \sum_{j=1}^m \left[(F_j - S_j) \left(\frac{\partial F_j}{\partial \alpha_k} - \frac{\partial S_j}{\partial \alpha_k} \right) \right]$$

$$\begin{aligned}
&= 2 \sum_{j=1}^m [(F_j - S_j)(-\Phi_{kj})] \\
&= 2 \sum_{j=1}^m \left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \Phi_{ij} - F_j \right) (\Phi_{kj}) \right]
\end{aligned} \tag{4}$$

고려된 구조형상함수 개수만큼의 가중치에 대해서 편미분을 하였기 때문에 미지수의 개수만큼인 n 개의 방정식이 도출되며, 목적함수를 최소화하는 가중치 계수를 산정하기 위해서 식(5)와 같이 각 편미분방정식의 값이 0이 만족되도록 하였다.

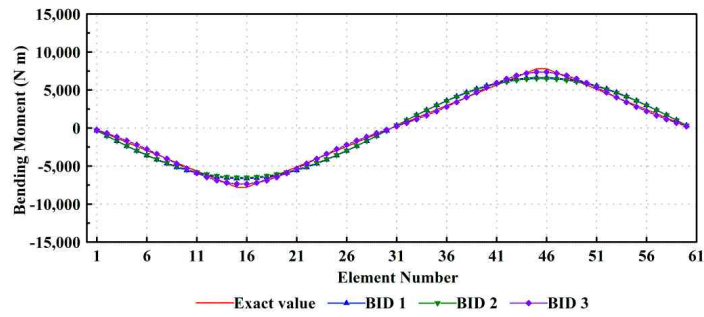
$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha_k} = 2 \sum_{j=1}^m \left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \Phi_{ij} - F_j \right) (\Phi_{kj}) \right] = 0 \tag{5}$$

위의 식(5)을 정리하면 최종적으로 다음과 같은 식(6)이 도출된다.

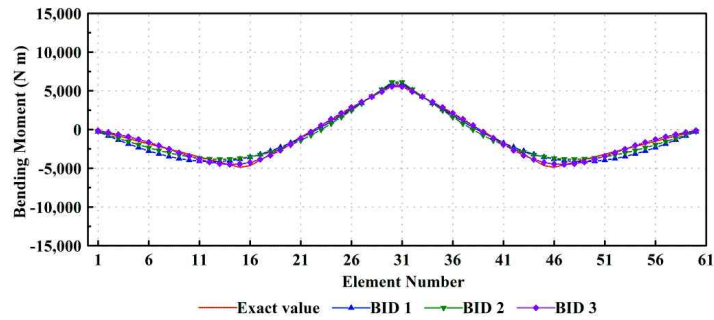
$$\begin{aligned}
&\therefore \frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha_k} \\
&\Rightarrow \sum_{j=1}^m \left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \Phi_{ij} \right) (\Phi_{kj}) \right] = \sum_{j=1}^m [(F_j)(\Phi_{kj})]
\end{aligned} \tag{6}$$

식(6)과 같은 총 n 개의 연립방정식을 풀이하여 최종적으로 목적함수를 최소화하는 값으로 구조형상함수 가중치 계수가 결정된다.

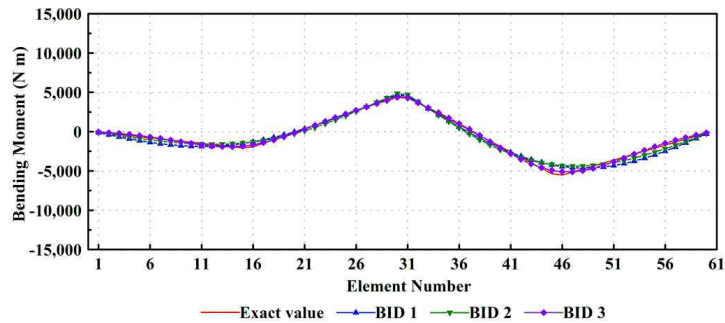
정밀한 형상 추정 결과를 도출하기 위해서는 구조물의 거동 형상이 다양하게 고려될 수 있도록 고려된 구조형상 함수가의 수가 증가 할수록 유리하지만 실제 구조물에서는 비용적인 측면 때문에 변위 계측 개소에는 제한이 있다. 이처럼 구조형상함수의 수(N)가 고려되는 변위계측 개소(M)보다 많은 경우에 식(6)과 같은 n 개의 편미분 연립 방정식이 방정식 간 독립성이 유지되지 않아 무한수의 해가 나오는 부정의 문제가 발생하게 된다. 이와 같은 부정의 문제를 해결하기 위해서 변위 계측 개소와 구조형상함수를 비교하여 Figure 1과 같이 각각 다른 해법을 적용하였다. $N=M$, $N<M$ 일 경우는 일반적인 연립방정식으로 해를 산정하고 $N>M$ 일 경우 여러 해 중 최소거리법(Mimnimu Length Solution)을 적용(G.R.Liu and X. Han, 2003)하고 QR Decomposition (B.N, Datta, 2007)로 해를 산정하여 가중치 계수를 결정하였다. 이러한 방법으로 결정된 각각의 가중치 계수를 각 구조형상함수에 대입하여 중첩형상의 각 절점의 변위를 도출하였다. 이렇게 도출된 변위를 다시 구조해석 모델에 대입하면 구조물의 내력을 계산 할 수 있다. 다음 그림은 개발된 알고리즘을 검증한 결과이다.



(a) Target deformed shape case 1 (RDS1)



(b) Target deformed shape case 2 (RDS2)



(c) Target deformed shape case 3 (RDS3)

그림. 개발된 알고리즘으로 추정한 구조물 내력

위 그림은 구조물의 휨모멘트선도를 도식화한 것이다. 위 그림에서 Exact Value는 실제 구조물의 휨모멘트 선도이며 BID1, BID2, BID3의 경우 추정된 모션으로 추정된 구조물 휨모멘트 선도이다. 총 3가지 변형형상을 대상으로 검증 연구를 수행하였으며, 위 그림에서 확인할 수 있듯이 모션으로 추정된 내력이 실제 내력과 매우 유사함을 확인 할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서 개발된 내력 해석 기술이 유용함을 증명하였다.

제3장 최종 연구성과

제1절 라이저 3차원 거동 해석 기술

가. 기술의 정의

라이저의 거동 평가 기술을 개발하기 위해서는 우선시 되어야 하는 것이 라이저의 거동 데이터를 확보하는 것이다. 하지만, 실제 거동 데이터를 확보하는 것은 불가능하다. 또한 거동 평가 기술을 개발하기 위해서는 라이저의 거동에 대한 정확한 이해가 뒷받침 되어야 한다. 본 연구에서는 라이저의 해석기술과 이를 통한 라이저 거동 DataBase를 구축하였다.

나. 연구 성과물

■ 거동해석 알고리즘

라이저의 3차원 거동 해석을 위한 해석 Flow Chart를 제시하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 FPSO용 라이저는 부유체에 부착되어 있는 형태 이므로 라이저의 거동해석을 위해서는 플랫폼/계류선/라이저를 고려한 상호작용 해석 기술을 필요로 한다. 이러한 라이저의 거동 해석을 하기 위해서는 그림 3.1과 같이 총 3단계를 수행해야 한다. 1단계에서는 부유체의 Hydrodynamic Coefficient인 부가 질량 계수, 댐핑 상수등을 계산하여 해석 프로그램에 입력 하기 위한 물성치를 계산한다. 2단계에서는 부유체에 작용하는 파랑하중, 풍하중, 조류 하중을 산정한다. 파랑 하중과 풍하중은 시간에 따라 변화하므로 주로 해당 지역에 맞는 에너지

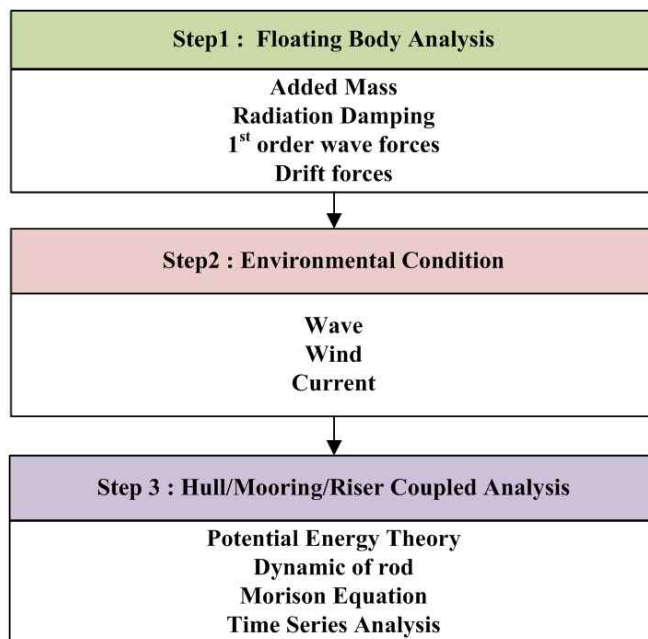


그림 3.1 라이저 3차원 해석 Flow Chart

스펙트럼을 이용해서 파랑과 풍하중 이력을 생성하게되며 , 조류는 시간에 따라 변화하지 않으므로 정적하중으로 고려할 수 있다. 마지막 단계에서는 모리슨 방정식과 파랑에너지 이론, 라이저 해석 이론을 이용해 플랫폼/계류선/라이저의 상호작용 해석을 수행한다. 이를 통해 라이저의 모션 해석을 수행할 수 있다.

■ 라이저 거동 해석 Database 구축

본 연구에서는 1,829m 수심에 계류되어 있는 200,000 DWT 탱크 용량을 가지고 있는 FPSO를 모델로 하였다. 총 12개의 계류선이 연결되어 있으며, 각 3개씩 총 4 그룹으로 4면으로 고정되어 있다. 각 계류선 그룹은 90°각도로 떨어져 있으며, 3개의 계류선은 각각 5°의 간격으로 연결되어 있다. 라이저는 총 13개의 SCR이 연결되어 있으며, 연결 형상은 그림 3.2와 같다.

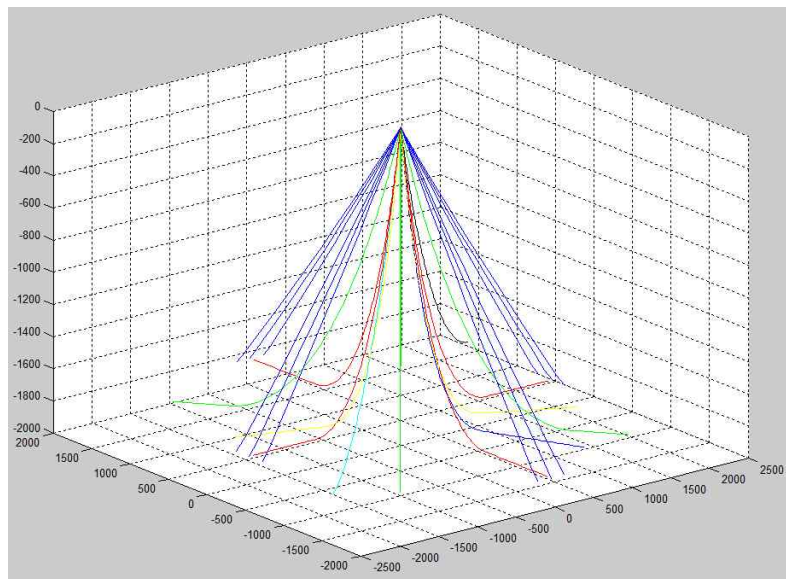


그림 3.2 계류선/라이저 시스템 형상

본 연구에서는 Gulf of Mexico 지역의 허리케인 100년, 200년 조건을 이용하여 wave와 current를 산정하였다. Wave산정을 위해서는 JONSWAP 스펙트럼을 이용하였으며, 해석 시간은 허리케인이 강타했을 때의 시간을 고려하여 3시간으로 생성하였다. 이외에도 일반적인 상태의 환경하중으로 고려하기 위해서 각각 ($H_s=6$, $T_p=10$), ($H_s=6$, $T_p=20$)일 때를 고려하여 총 4개의 환경하중조건에서 해석을 수행하였다. 풍속스펙트럼은 API Bulletin 2INT-MET의 에너지 스펙트럼을 이용하였다.

다. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

현재 국제 유가의 하락의 원인으로 인해 해양플랜트 관련 산업이 전세계적으로 침체되어

있다. 본 연구와 관련된 기술은 해양플랜트 설계 시 핵심이 되는 기술로써 향후 관련 산업이 침체에서 벗어날 때 매우 필요한 기술이다. 현재 우리나라의 플랜트 산업은 엔지니어링에 대한 핵심기술이 부족한 것이 사실인데 이러한 해석 기술은 향후 관련 산업이 되살아 날때를 대비해야한다.

제2절 라이저 모션 모니터링 기술

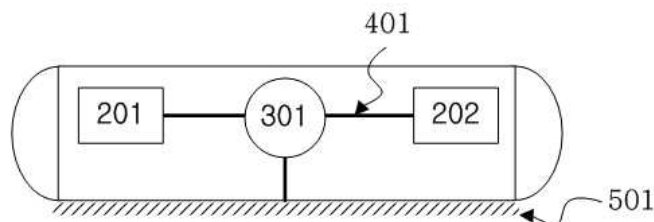
가. 기술의 정의

라이저는 수중이라는 환경적 한계로 인해서 라이저 응답을 계측하는 것은 한계가 있다. 일반 토목구조물에서 흔히 사용되는 레이저 변위계, GNSS, 영상 측량과 같은 기술을 사용할 수 없다. 또한 Acoustic센서를 이용한다하더라도 수·발신 거리가 늘어나게 되면 그만큼 정밀도가 하락한다. 본 연구에서는 접촉식 센서인 가속도계와 경사계를 이용한 라이저 모션 모니터링 기술을 개발하였다.

나. 연구 성과물

■ 가속도, 경사 정보를 융합한 모션 모니터링 알고리즘

가속도를 수치적분법을 이용하여 이중적분하게 되면 시간이 증가 할수록 측정 노이즈에 의한 변위 왜곡 현상이 증가한다. 하지만 임의의 짧은 시간동안의 변위 이력은 계산이 가능하다. 즉 시간이 지날수록 정교한 노이즈 제거 과정을 거치더라도 오차가 누적되므로 누적된 오차를 보정하기 위한 방법이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 경사센서를 가속도 센서와 동시에 활용하였다. 경사센서는 센서의 종류에 따라 측정 순간에서의 오차는 크게 발생할 지라도 가속도 센서와 같이 적분 과정을 거치지 않으므로 오차가 누적되지 않기 때문에 가속도 데이터의 오차 누적 경향을 경사 센서 데이터로 보정이 가능하다. 이러한 두 센서의 장점을 활용하여 다음그림 같은 센서로 구성된 시스템을 고안하여 센서



201 : 가속도센서(A_L), 202 : 가속도센서(A_R), 301 : 경사센서(I)

401 : 고정장치, 501: 장치 부착면

[장치 구조도(101)]

그림 3.3 모션 측정 장치 구조도

부착지점의 수직 변위 이력($u_T(t)$) 산정이 가능한 시스템을 개발하였다. 본 발명에서 고안된 시스템은 센서 설치 방향과 센서의 측정 방향에 따라 3축 방향의 변위 이력 산정이 가능하나 본 연구에서는 1차원 변위 이력 산정을 기준으로 설명한다.

이 시스템은 2개의 가속도 센서와 1개의 경사센서로 구성되어 있다.(그림 3.3) 가속도센서(201,202)는 T자형 지그 또는 평평한 보드(401)에 부착되어 중앙에 설치된 경사센서(301)를 기준으로 대칭으로 설치되어 있으며 경사센서(301)는 수직 변위를 측정하고자 하는 지점 또는 면(501)의 수직방향선상에 있다. 고안된 장치는 구조물(부재)를 따라 움직이면서 구조물의 가속도와 경사변화량을 측정한다.

다음 그림 3.4와 같이 두 개의 가속도 센서를 통해 측정된 가속도 데이터는 ①가속도 보정부, ②노이즈 제거부, ③가속도 적분부, ④연산부에 이르는 순차적 데이터 처리 과정을 통해 최종적으로 변위 이력을 산출하게 된다.

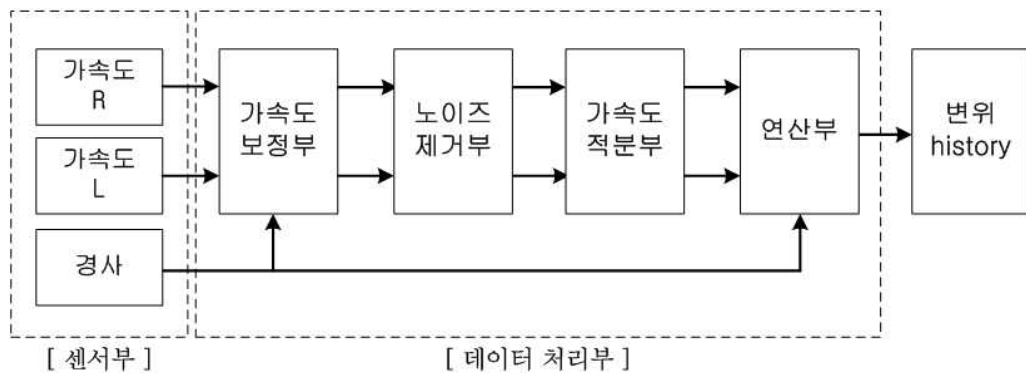


그림 3.4 모션 측정 장치 데이터 처리 구조도

①가속도 보정부에서는 경사 센서의 측정값을 이용하여 가속도센서의 회전에 따른 중력 영향을 보정한다. 가속도 센서는 중력을 기준으로 측정하므로 센서가 중력방향의 움직임이 전혀 없더라도 센서가 제자리에서 회전을 하게 되면 가속도값이 달라진다. 이로 인해서 측정하고자 하는 지점의 수직 방향 가속도만을 계산하기 위해서는 가속도 센서 회전에 따라 중력 가속도 값을 보정해 준다.

②노이즈 제거부에서는 가속도 센서와 경사센서의 측정 잡음을 제거한다. 가속도 센서는 주파수 대역 필터링 기법을 이용하여 원하는 대역 이외의 주파수를 차단한다.

③가속도 적분부에서는 앞선 데이터 처리 과정을 통해 산출된 가속도 신호를 이용해 가속도 신호를 이중 적분한다.

그림과 같이 센서 시스템을 구성하였을 경우 각각의 가속도센서(A_R , A_L)에서 측정되는 가속도 신호는 센서의 수직방향 가속도(u 방향)와 회전방향의 가속도(w 방향)를 포함하게 된다. 측정되는 가속도는 다음의 식(1)과 식(2)와 같으며 경사센서 I 에 의해서 측정되는 경사 신호는 식(3)과 같다.

$$A_R : a_R(t) = a_T(t) + a_s(t) + \epsilon_R(t) \quad \text{----- 식 (1)}$$

$$A_L : a_L(t) = a_T(t) - a_s(t) + \epsilon_L(t) \quad \text{----- 식 (2)}$$

$$I : s(t) \quad \text{----- 식 (3)}$$

여기서, a_T : 측정하고자 하는 수직방향 가속도

a_s : 측정하고자 하는 지점의 회전으로 인해서 발생하는 가속도

ϵ_R, ϵ_L : A_R, A_L 가속도계에서 각각의 노이즈

$s(t)$: 측정지점의 회전각(dergee)

식(1)과 식(2)를 시간 t 에 대해서 적분하게 되면 매순간 t 에서의 A_R, A_L 의 속도를 산정할 수 있으며, 다음의 식(4), 식(5)와 같다.

$$v_R(t) = \int_{t_1}^{t_2} a_R(t) dt = [(a_T + a_s)t]_{t_1}^{t_2} + [\epsilon_R \cdot t]_{t_1}^{t_2} + v_{IR} \quad \text{----- 식 (4)}$$

$$v_L(t) = \int_{t_1}^{t_2} a_L(t) dt = [(a_T + a_s)t]_{t_1}^{t_2} - [\epsilon_L \cdot t]_{t_1}^{t_2} + v_{IL} \quad \text{----- 식 (5)}$$

여기서, v_{IR}, v_{IL} 은 A_R, A_L 의 각각의 초기 속도이며 센서의 기하학적 배치로 인해서 v_{IR} 과 v_{IL} 은 다음의 식(6)과 같다.

$$\frac{1}{2}(v_{IR} + v_{IL}) = v \quad \text{----- 식 (6)}$$

위의 식(4), (5)를 시간 t 에 대해서 한번 더 적분하게 되면 매순간 t 에서의 A_R, A_L 의 변위 u_R, u_L 을 산정 할 수 있으며, 다음의 식 (7), 식(8)과 같다.

$$u_R(t) = \int_{t_1}^{t_2} v_R(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} [(a_T + a_s)t]_{t_1}^{t_2} dt + \int_{t_1}^{t_2} [\epsilon_R \cdot t]_{t_1}^{t_2} + v_{IR} dt \quad \text{----- 식 (7)}$$

$u_{R1} \qquad \qquad \qquad u_{R2}$

$$u_L(t) = \int_{t_1}^{t_2} v_L(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} [(a_T + a_s)t]_{t_1}^{t_2} dt + \int_{t_1}^{t_2} -[\epsilon_L \cdot t]_{t_1}^{t_2} + v_{IL} dt \quad \text{----- 식 (8)}$$

$u_{L1} \qquad \qquad \qquad u_{L2}$

식(7)과 식(8)에서 u_{R1} 과 u_{L1} 은 실제 측정하고자 하는 변위이지만 u_{R2} 와 u_{L2} 는 노이즈와 초기조건의 불확실성으로 인해서 시간에 따라 특정한 패턴으로 랜덤하게 발생하는 오차로 이 오차가 가속도를 이용한 변위 계산 오차와 왜곡을 발생시킨다. 이와 같이 가속도

데이터를 이중적분하게 되면 왜곡된 계산 결과가 도출이 된다.

④연산부에서는 이중적분된 가속도 데이터를 경사센서 데이터를 이용하여 보정하는 단계를 거치게 된다. 실제 계측 시스템에서 가속도만으로 변위를 계산 할 경우 비교 기준을 설정 하는 것이 거의 불가능하기 때문에 매 순간의 오차의 정도를 계산 할 수 가 없다. 하지만 본 발명에서는 이러한 오차를 계산하고 보정하기 위해서 경사센서를 이용하였다. 앞선 식(3)과 같이 경사센서 I 에 의해서 측정되는 경사 신호는 다음과 같다.

$$I : s(t) \quad \text{----- 식 (3)}$$

여기서, $s(t)$: 측정지점의 회전각(dergee)

경사센서로 측정된 경사 신호는 [도4]와 같은 센서의 배치로 인해서 센서 회전에 의한 가속도 위치의 변위를 다음 식(9)와 같이 표현 할 수 있다.

$$u_s(t) = s(t) \times L \quad \text{----- 식 (9)}$$

또한 가속도 센서와 경사 센서의 기하학적 조건을 이용하여 측정 가속도로 구한 변위 이력과 경사센서로 구한 변위와의 관계식은 다음의 식(10)과 같다.

$$\frac{1}{2}(u_R(t) - u_L(t)) - u_s(t) = E(t) \quad \text{----- 식 (10)}$$

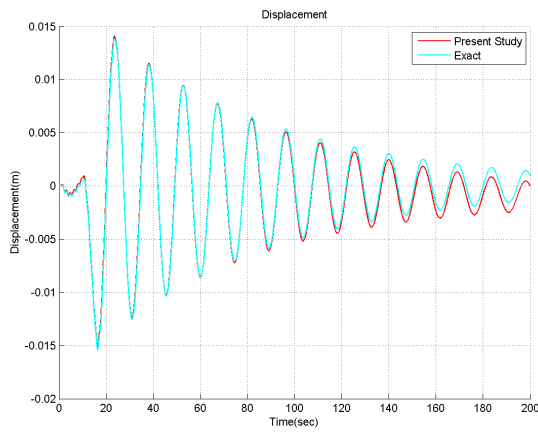
여기서, $E(t)$ 는 가속도와 경사센서의 측정 오차로 인해서 발생하는 오차의 총합을 의미한다. 만약 두 센서에서 측정된 데이터에 오차가 없을 경우 E 값은 0이다. 여기서, $E(t)$ 의 값의 기울기가 임의의 시간 간격으로 변화하는 양상이 나타나는데 여기서의 기울기는 가속도를 이용해 계산된 변위가 발산하면서 발생하는 오차가 지배적이라고 할 수 있다. 경사 센서의 경우는 오차가 누적되지 않기 때문이다. 본 발명이 측정 대상으로 하는 구조물은 위치가 이동하는 것이 아니라 평균 변위가 0을 기준으로 진동하기 때문에 이러한 발산하는 오차를 기울기로 보정해 주게 되면 변위를 계산할 수 있다.

시간 t 에 따른 $E(t)$ 의 기울기를 계산하고 $E(t)$ 의 기울기 변화가 일정 수준 이상 되었을 때 임의의 시간 간격으로 나누고 이때의 u_R 과 u_L 의 기울기를 보정한다. 보정된 A_R, A_L 의 변위를 $\overline{u_R}, \overline{u_L}$ 이라고 하면 구하고자 하는 u_t 는 다음의 식(11)과 같다.

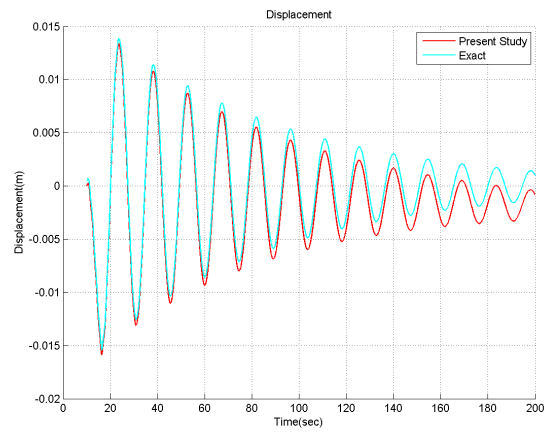
$$u(t) = \frac{1}{2}(\overline{u_R}(t) + \overline{u_L}(t)) \quad \text{----- 식 (11)}$$

■ 개발 알고리즘 검증

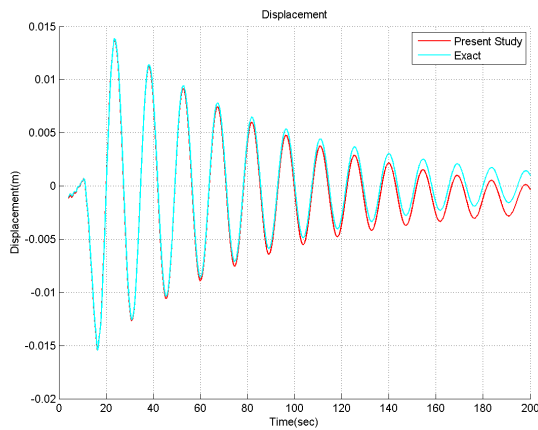
모션 추정 알고리즘을 이용한 모션 추정결과의 오차를 비교 하였다. 단순보 모델로 검증을 실시하였다. 가속도 신호는 노이즈가 없을 경우로 가정하였으며, case 1,2,3,4는 각각 초기 속도가 다를 경우이다. 초기 속도에 오차가 존재할 경우 추정 변위는 발산을 하게 되어 오차가 증폭되는 효과가 나타난다. 다음 그림 3.5는 단순보 모델의 중앙부 변위를 추정한 결과이다.



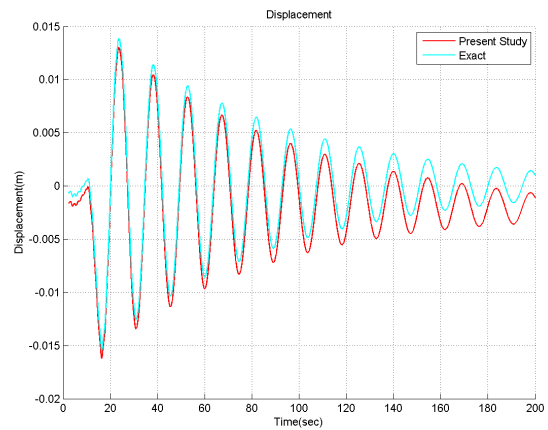
a) Case 1



b) Case 2



c) Case 3



d) Case 4

그림 3.5 시간에 따른 모션 추정 계산 결과

표 3.1 서로 다른 초기 속도에 따른 모션 추정 MCC 비교

Case Number	MCC
1	0.9898
2	0.9486
3	0.9780
4	0.9222
Average	0.96

개발된 모션 추정 알고리즘의 프로토타입을 검증한 결과 MCC값이 실제 모션 형상과의 일치성이 0.96으로 나타났다. MCC값은 1일 경우 비교대상과 비교 기준값이 완전히 일치한다는 것을 뜻하며, MCC값이 작아질수록 두 개의 비교대상의 차이가 매우 크다는 것을 의미한다. 비교결과 평균으로 4%이내, 최대 8%오차 이내의 정밀도를 확보 할 수 있었다.

다음은 가속도 신호에 랜덤 노이즈가 존재할 경우이다. 가속도 신호에 랜덤 노이즈가 존재할 경우 다음그림[]과 같이 적분된 변위는 오차가 누적되어 발산한다. 하지만, 개발된 알고리즘으로 계산된 변위가 그림[]에 나타나 있다. 초기 시간에 미소한 변위에서 불일치하는 부분이 있지만 전체적인 변위 변화량은 실제 변위와 상당히 일치하는 것을 확인할 수 있다.

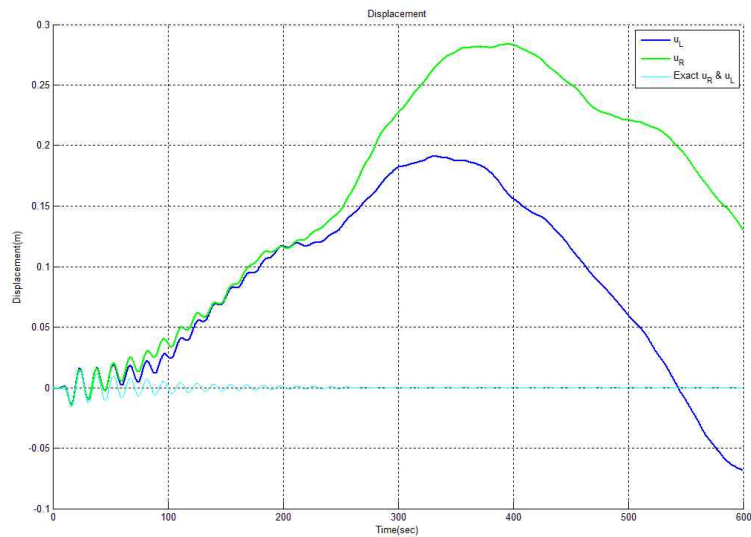


그림 3.6 초기 조건과 계측 인한 계산 변위 발산

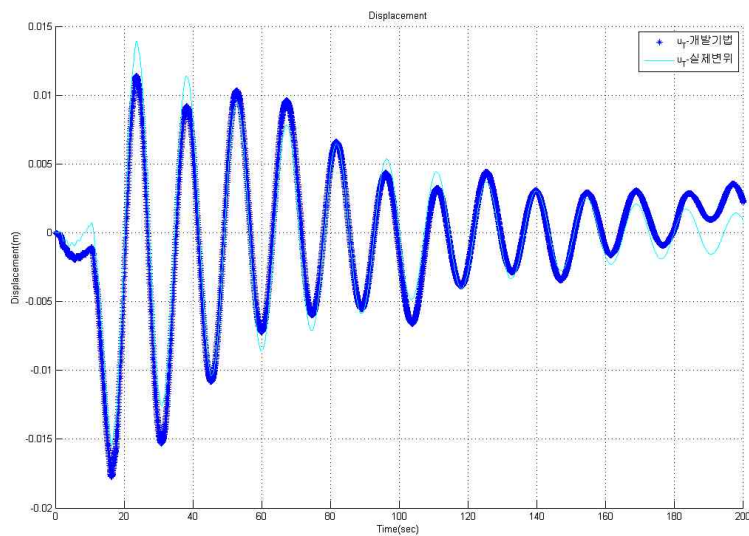


그림 3.7 최종 계산된 $u(t)$

다. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

본 개발기술은 수중이라는 매우 제한적인 상황에서 구조물의 변위를 측정하기 위해 개발된 기술이다. 일반적으로 변위 모니터링을 위해서는 GNSS, 레이저 센서 등 직접적인 변위 측정 기법을 활용하지만, 라이저와 같이 위성신호를 수신이 불가능한곳, 그리고 변위 측정을 위한 기준점을 설치할 수 없는 상황에서는 간접적으로 변위를 계산해야만 한다. 그러한 경우 본 개발 기술은 매우 간편하게 활용 할 수 있다. 그래서 본 연구 기술은 라이저 뿐 아니라 다양한 구조물에 적용가능하고 기계 구조물과 같은 곳에도 적용이 가능한바 다양한 방면으로 활용이 가능할 것이다.

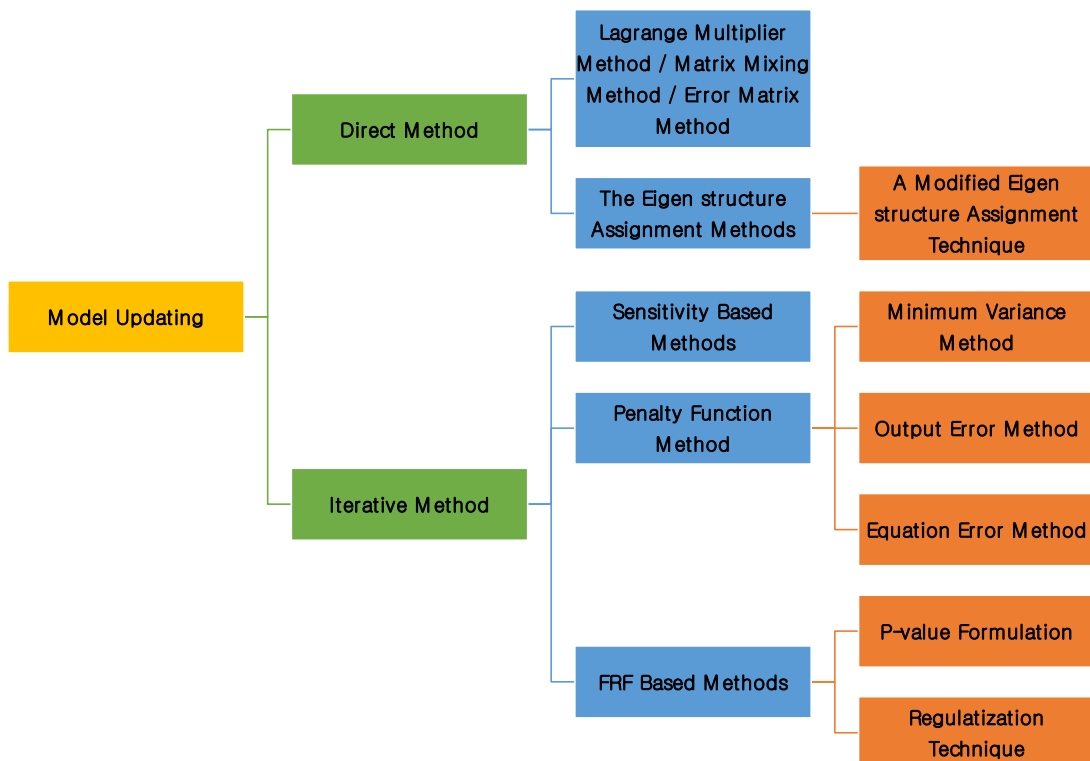
제3절 라이저 해석적 모델 구축 기술

가. 기술의 정의

라이저의 내력 해석을 위해서는 라이저의 거동을 올바르게 구현 할 수 있는 해석 모델을 필요로 한다. 본 기술에서는 실제 라이저의 구조 특성 정보와 일치하는 구조해석 모델 도출을 위한 업데이트 기법을 구축하고 라이저의 비선형 거동 특성을 구현할 수 있는 해석적 모델을 구축하였다.

나. 연구 성과물

■ 라이저의 모델 업데이트를 위한 유한요소모델개선기법 분석



정확한 해석모델을 만들기 위한 모델 개선기법은 시스템규명기법의 한 분야로서 실험결과를 기초로 해석결과와의 오차를 최소화시킴으로써 해석모델의 강성, 질량 등의 시스템 변수를 보정하여 해석모델을 개선하는 과정을 말한다. Rad(1997)는 모델개선기법을 그림 3.8과 같이 분류하였다.

모델 업데이트 방법은 직접법과 간접법으로 구분할 수 있다. 직접법은 측정에 의해 구해진 불완전한 고유진동수와 모드형상을 사용하여 해석모델을 직접 보정하는 방법이다. 반복법은 직접법의 문제점을 개선하고 더 정확한 모델 개선을 위해 반복해석을 수행하고 시스템 행렬을 개선한다. 반복법은 업데이트 변수의 민감도에 기초한 민감도 기법과 구조물의 주파수 응답함수를 이용한 방법으로 분류 할 수 있다.

■ 라이저의 비선형 해석 모델 구축

라이저는 목적에 따라 드릴링 라이저와 생산용 라이저로 구분할 수 있다. 또한 라이저는 형상에 따라 수직 라이저와 현수선 라이저로 구분할 수 있다. 이러한 라이저의 형상은 해저 자원의 분포에 따라 결정 된다. 라이저의 끝단은 해저면에 고정되어 있고 다른 끝단은 배와 같은 플랫폼에 연결되어 있다. 라이저의 거동을 정확히 이해하기 위해서는 우선 라이저의 거동에 영향을 끼치는 지배 인자들을 정의해야 한다. 라이저의 거동에 영향을 미치는 주요 인자는 다음과 같다.

- ① Vessel Induced Motion(VIM)
- ② Vortex Induced Vibration(VIV)
- ③ Touch Down Zone(TDZ)
- ④ Flow Line bucking

주요 인자에 대한 설명은 다음과 같으며, VIM, VIV의 경우 수직 라이저와 현수선 라이저 모두에 적용되며, Touch Down Zone과 Flow Line Buckling는 현수선 라이저에만 적용된다.

① Vessel Induced Motion(VIM)

상부 플랫폼의 움직임으로 인해서 발생하는 라이저의 거동을 VIM이라고 한다. 상부 플랫폼은 파도, 바람에 의해서 시간에 따라 움직이며 플랫폼의 종류에 따라 몇 m내에서 움직이기도 한다. 상부 플랫폼의 움직임이 증가하게 되면 라이저의 파손을 유발 할 수 있기 때문에 일반적으로 라이저 설계 시 다음을 기준으로 플랫폼의 움직임을 설계한다.

일반적인 상황일 때 수심의 3% 이내의 플랫폼 움직임을 허용하며, 극한 조건일 경우 수심의 5% 이내의 플랫폼 움직임을 허용한다.

② Vortex Induced Vibration(VIV)

라이저는 수심에 따라서 길이가 최대 수천 m 까지 이다. 파도와 바람은 얕은 수심에만 영향을 미치고 수심이 깊어질수록 라이저는 조류에 의한 하중을 받는다. 조류가 라이저에 작

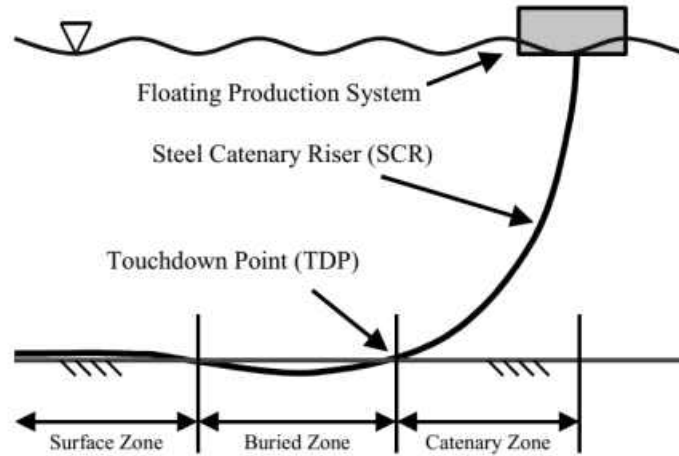


그림 3.9 일반적인 현수선 라이저의 형상

용하면서 와류가 발생하게 된다. 마치 건물에 바람이 불 때 건물 뒷면에 와류가 발생하는 것과 같은 동일한 원리이다. 이러한 와류가 발생하게 되면 진동이 발생하게 되고 이러한 이러한 진동은 라이저의 피로 수명을 단축시키게 된다.

③ Touch Down Zone(TDZ)

위 그림 3.9 과 같이 현수선 라이저(Catenary Riser)는 포물선 형태의 라이저이기 때문에 플랫폼의 움직임과 라이저의 거동에 따라서 라이저의 일부가 해저면에 붙었다가 떨어졌다가 반복하게 된다. 이와 같이 라이저가 해저면에 붙었다 떨어졌다하는 구간을 TDZ이라고 한다. 이러한 구간은 결국 라이저의 경계조건이 변화하는 것을 의미한다. 이러한 경계조건의 변화는 라이저의 거동이 비선형 거동을 나타냄을 의미한다.

④ Flow Line buckling

현수선 라이저의 경우 TDZ에서부터 라이저 끝단까지 라이저는 해저면에 놓여있게 되며 이 부분을 Flow Line라고 한다. 이때 이 부분은 축력으로 인해서 좌굴이 일어날 수도 있는데 이러한 현상을 Flow Line Buckling이라고 한다.

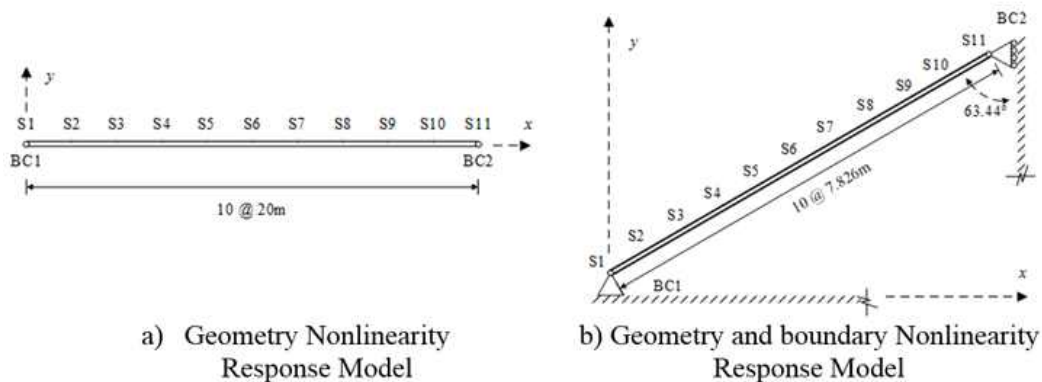


그림 3.10 라이저 비선형성을 구현하기 위한 해석 모델

라이저의 경우 매우 유연한 구조물이고 상부 플랫폼의 허용 움직임 범위가 매우 크기 때문에 기하 비선형성을 고려해야한다. 또한 현수선 라이저의 경우 라이저 거동에 따라 TDZ에서의 경계 조건의 위치가 변화하므로 경계 비선형성을 고려해야한다. 이와 같은 비선형적 거동을 고려하기 위해서 그림 3.10과 표 3.2 와 같이 다양한 경계조건모델을 구축하였다.

표 3.2 해석 모델의 경계 조건

Case	Nonlinearity	Boundary Condition		Model Description
		BC1	BC2	
G-HR	Geometry	Hinge	Roller	Vortex Induced Motion
G-HFR		Hinge	Fix	
G-FFI		Free	Fix	Vessel Induced Motion
GB-HR	Geometry + Boundary	Hinge	Vertical Roller	Touch Down Zone

G-HR과 G-HFR인 경우 플랫폼이 움직이지 않는 상태에서 해류로 인해 라이저에 와류(Vortex)가 발생하여 와류로 인한 라이저 움직임(VIV)을 모사하였으며, G-FFI인 경우 바람, 파도로 인해 플랫폼의 움직임에 의해 발생하는 라이저 모션(VIM)을 구현하였다. GB-HR인 경우 하중이 작용하여 대변형이 발생 될 때 구조물의 일부분이 바닥에 닿게 되고 그 이후에는 경계 비선형성을 고려한 거동해석이 이루어져야 한다. 이러한 현상은 현수선 라이저에서 Touch Down Zone(TDZ)의 거동과 일치하게 된다.

다. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

구조물 유지관리에서 현재 한계점으로 부각되는 부분중의 하나가 정밀한 해석 모델이 있어야만 해석 결과의 정밀도가 향상 된다는 점이다. 현재 다양한 모델 업데이트 기법들이 제시되고 있다. 이런 때 각 구조물의 거동 특성에 알맞은 모델 업데이트 기법이 사용된다면 건전도 평가의 정밀도가 향상 될 수 있을 것이다. 앞으로 더더욱 다양한 구조물의 유지관리가 중요시 될 것이기 때문에 본 연구에서 검토된 기술들이 다방면으로 활용 될 수 있을것이라 판단된다.

제4절 라이저 건전도 모니터링 기술

가. 기술의 정의

라이저의 건전도 모니터링을 위해서 가속도계, 경사계, 플랫폼의 DP(Dynamic Positioning)정보를 연동하여 처리하는 모니터링 시스템을 제안하였다. 또한 라이저 측정 모션으로부터 라이저 전체계의 내력을 해석하고 이를 통해 피로 수명을 분석 할 수 있는 기법을 개발하였다.

나. 연구 성과물

■ 라이저 건전도 모니터링 시스템 제안

라이저에서 측정된 모션 데이터를 기반으로 라이저의 건전도 평가를 위해서 시스템은 크게 라이저의 모션을 측정하는 센싱부, 측정된 데이터를 이용하여 라이저의 거동을 평가하는 시스템부, 처리된 데이터를 평가하여 라이저의 이상 유무 및 피로수명을 분석하는 제어부, 처리된 데이터를 평가하여 최종적으로 구조물의 관리자에게 정보를 전송해주는 사용자부로 구성된다.(그림 3.12)

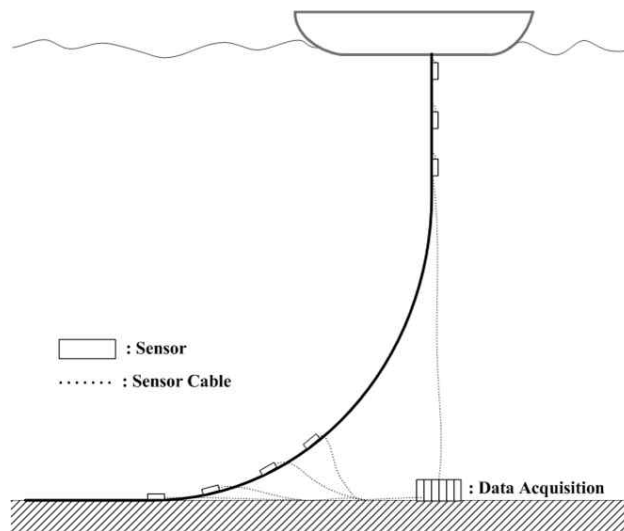


그림. 3.11 라이저 모니터링 시스템 구성도

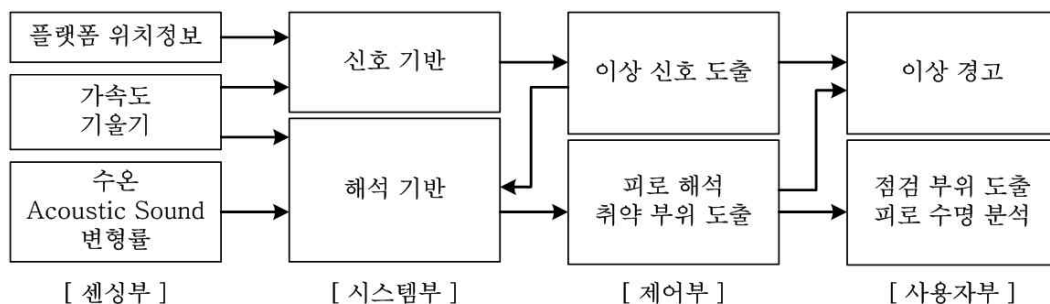


그림 3.12 모니터링 시스템 데이터 흐름도

센싱부는 거동을 계측하는 각종 센서와 DAQ로 구성된다. 일반적으로 토목 구조물에서 다양하게 쓰이는 센서 중 레이저 처짐계, 광파기, GNSS 센서와 같이 기준점을 필요로 하거나 위성 신호를 수신하는 센서들은 수중에서 사용이 불가능하다. 본 기술에서 활용하는 센서 정보는 크게 레이저 가속도, 레이저 기울기, 수온정보이며 어쿠스틱 사운드를 이용하여 특정 지점에서의 레이저의 움직임을 측정하고 변형률 센서를 통해 레이저 변형률을 측정한다. 레이저는 1000m이상의 길이를 가지는 것도 있기 때문에 레이저에 부착된 모든 센서를 직접적

으로 해상 플랫폼에 연결하기는 매우 어려우므로 수면 부근의 센서는 직접적으로 해상 플랫폼의 DAQ에 연결하고 TDZ(Touch Down Zone)부근의 센서들은 해저에 DAQ를 설치하여 계측 정보를 수집 후 해저의 DAQ를 상부 플랫폼쪽으로 연결하여 측정 배선을 최소화 한다. 라이저의 가속도를 측정하는 장비는 라이저의 3축의 움직임을 모두 측정할 수 있어야 하며, 기울기 센서의 경우는 경사계나 자이로스코프 등이 사용 될 수 있다. 또한 직접적으로 센서가 설치되는 것은 아니지만 플랫폼의 자동위치제어시스템(DP)에서 측정되는 플랫폼의 위치 정보를 활용한다. 일반적으로 구조물의 온도의 경우 밤과 낮, 여름과 겨울 등 계절적 요인에 따라 구조물의 강성 변화에 큰 영향을 주는 요소이다. 수중에서는 깊이에 따라 수온이 변화하므로 구조물의 거동 평가에 이런 온도에 대한 영향이 고려되지 않는다면 잘못된 거동 평가 결과를 야기 할 수 있어 온도 계측에 대한 영향은 정확한 데이터 해석을 위해서는 모션 측정 값못지 않게 중요한 사항이다.

시스템부에서는 계측된 데이터를 이용해 라이저 건전도 평가가 수행된다. 시스템부는 크게 두 부분의 처리기반으로 구성된다. 계측 데이터 경향 학습을 통해 계측 데이터의 이상 유무를 실시간으로 처리하여 이상 상황 발생 시 즉각적으로 판단 할 수 있는 신호기반 시스템부, 일정기간을 간격으로 주기적으로 처리되거나 데이터 처리 기반에서 이상 유무 신호가 발생하였을 경우 계측 모션을 이용한 구조해석을 통해 내력 평가를 통해 구조물의 건전도를 평가할 수 있는 해석 기반의 시스템부로 구성된다.

데이터기반 시스템부의 경우 라이저의 계측 가속도 및 기울기 데이터와 온도, 플랫폼의 움직임 사이의 패턴 분석을 통해서 결정된다. 플랫폼의 움직임이 라이저의 거동에 지배적으로 영향을 미치기 때문에 플랫폼의 움직임과 그에 따른 라이저의 움직임을 분석할 경우 라이저의 이상 유무를 판단 할 수 있다. 학습 조건으로 이러한 매개변수를 독립적으로 처리하지 않고, 라이저의 환경조건과 라이저의 움직임이 계측되는 조건을 최대한 반영하여 학습을 한다. 이를 통해 매개변수와 변위와의 상관관계를 학습하고 이런 패턴 인식은 일정 단위 기간으로 저장되어 장기 거동 분석이 가능하도록 구성된다. 패턴 분석시에는 비슷한 조건의 매개변수 조건에서 학습된 패턴의 변위데이터가 아닌 다른 영향이 계측 된다면 이는 이상 신호로 분류하여 제어부로 이를 전송하게 된다.

해석기반 시스템부에서는 우선적으로 가속도 센서와 기울기 센서를 융합하여 가속도에 포함된 중력에 대한 영향을 제거해 준다. 일반적인 토목 구조물인 경우 가속도 센서가 중력에 대한 영향을 크게 받지 않지만, 6자유도 모션을 보이는 라이저의 경우 측정된 가속도에 중력에 대한 영향이 포함되어 있어 측정 오차가 존재한다. 라이저의 모션에 의해서만 발생하는 가속도를 산출하여 정밀도를 향상한다. 그 이후 주파수 대역 필터링 기법을 통해 필터링 과정을 거치며, 기울기 데이터를 이용하여 백색잡음을 제거한다. 각종 노이즈가 제거된 가속도 데이터를 이용해 속도를 추정하여 초기속도를 보정하는 과정을 거친다. 이를 통해 라이저의 6자유도 모션을 산정한다. 산정된 모션 중 특정 부위에 부착된 어큐스틱 사운드 센서를 통해 추정된 모션을 검증하여 데이터의 신뢰도를 향상시킨다. 산정된 6자유도 모션을 FE구조해석 모델을 이용해 내력을 계산하게 된다. 이때 FE모델은 구조물에서 계측된 온도를 이용해 강성을 보정하게 된다. 구조물의 강성에 따라 같은 변위라 하여도 내력에 차이가 나기 때문에 정확한 내력 산정을 위해서는 온도 보정이 필수적이다. 계산된 내력이 구조물의 항복 응력이

나 과도한 응력이 계산되는 곳을 분석하고 설계시보다 다른 응력 부위를 찾을 수 있도록 한다. 하지만 여기서 계산되는 내력은 절대치가 아니라 특정 시점 이후로의 상대치를 의미한다.

제어부에서는 시스템부에서 계산된 데이터를 이용하여 이상신호 처리 및 라이저 취약 부위 판단을 위한 과정을 수행한다. 신호기반의 시스템부에서 라이저 거동의 이상신호가 감지되면 사용자에게 위험 경고를 전송하게 되고 구조해석기반의 처리를 수행하도록 신호를 전달한다. 이를 통해서 구조해석기반의 처리를 통해서 내력을 판단 근거로 기준으로 구조물의 취약 부위를 산정하게 된다. 산정된 취약 부위 중에서 취약도 높은 부재별로 취약도를 산정하게 되고 사용자에게 구조물의 취약도에 따른 보장 및 점검 우선순위를 도출하게 된다.

■ 라이저 내력 해석을 통한 피로 수명 예측 기술

라이저의 피로 해석을 위해서는 내력을 계산해야하고 내력 계산을 위해서는 라이저의 전체 거동 형상이 필요하다. 앞서 개발된 라이저 모니터링 기술은 측정된 가속도와 각속도를 이용해서 센서가 설치된 부위의 라이저 변위를 계산하는 것이다. 만약 충분한 개수의 센서가 라이저에 설치가 된다면 라이저의 전체 형상을 특별한 처리 없이 바로 계산 할 수 있지만 센서의 개수 증가는 비용증가와 직결되므로 설치 개소에 한계가 있을 수밖에 없다. 그래서 한정된 위치에서 측정된 라이저 모션을 이용하여 전체 라이저의 거동 형상을 추정하는 알고리즘이 필요하다. 시간에 따른 라이저의 내력 변화를 계산하면 이를 통해 피로 수명을 계산할 수 있다. 본 연구에서 개발된 라이저 모니터링 기술을 이용하여 라이저의 내력을 추정하기 위한 알고리즘을 그림 13.3과 같이 개발하였다. 여기서 모션은 라이저 거동 변위를 의미한다. 이를 위해 구조물이 실제 거동 할 수 있는 여러 형상을 구조형상함수라 정의하였다. 정의된 구조형상함수에 임의의 가중치를 부여하고 이들 형상들을 중첩하여 중첩형상을 도출하였다. 도출된 중첩형상의 변위와 실제 구조물에서 계측된 변위와의 변위 오차를 최소화하는 목적함수를 구성하였다. 목적함수는 최소제곱법을 이용하여 오차를 최소화하였으며, 이를 통해 구조형상함수 가중치를 계산하였다. 계산된 가중치를 각 구조형상함수에 대입하여 최종적으로 계측 변위를 이용한 미 측정 지점의 변위들을 추정하여 구조물 형상을 도출하였다.

-구조 형상 함수(Structural Shape Function)

구조물 유한요소모델을 이용하여 구조물이 실제 거동 할 수 있는 다양한 형상을 구조형상함수라 정의하였다. 구조형상함수는 각 절점의 변위벡터 행렬로 구성된다. 이들 함수는 해석 모델에 다양한 하중 경우를 재하하여 얻은 형상과 자유 진동 해석을 통해 얻은 모드 형상 등 다양한 형상으로 구성할 수 있다. 여러 구조형상함수(Φ_i)에 각각의 가중치(α_i)를 부여하고 이들을 중첩하면 다음 식(1)과 같은 중첩형상 $\mathbf{S}$ 를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{S} = \alpha_1 \Phi_1 + \alpha_2 \Phi_2 + \cdots + \alpha_n \Phi_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Phi_i \quad (1)$$

여기서,

S : 구조형상함수 중첩형상

Φ_i : 구조형상함수

α_i : 구조형상함수 가중치

n : 고려된 구조형상함수의 개수

-목적함수(Object Function)

실제 구조물의 각 지점에서 계측된 변위 데이터를 F_j 라 하고 총 m 개의 계측 개소에서 변위를 계측 하였을 경우 j 는 계측 지점 위치 번호로써 $j=1,2,3 \dots, m$ 이다. 실제 구조물에서 계측된 지점의 변위 F_j 와 이와 동일한 지점에서의 구조형상함수로 중첩된 형상의 변위 오차는 식(2)와 같이 구성할 수 있다.

$$Error = \sum_{j=1}^m (F_j - S_j) \quad (2)$$

식(2)의 변위 오차를 최소화는 구조형상함수 가중치를 산정하기 위해서 최소제곱법(Least Square)을 도입하여 오차 제곱의 합을 최소화 하는 목적함수를 구성하였다. 이를 식(2)에 적용하여 다음 식(3)과 같은 목적함수를 최종적으로 구성하였다.

$$\epsilon = \sum_{j=1}^m (F_j - S_j)^2 \quad (3)$$

-구조형상함수 가중치 계수(Weight Factor)

도출된 목적함수로 각각의 구조형상함수 가중치를 산정하기 위해서 식(3)을 각각의 가중치에 대해서 편미분을 하여 식(4)와 같은 편미분 방정식을 구성하였다. 여기서, $k=1,2,3 \dots, n$ 이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha_k} &= 2 \sum_{j=1}^m \left[(F_j - S_j) \left(\frac{\partial F_j}{\partial \alpha_k} - \frac{\partial S_j}{\partial \alpha_k} \right) \right] \\ &= 2 \sum_{j=1}^m [(F_j - S_j) (-\Phi_{kj})] \\ &= 2 \sum_{j=1}^m \left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \Phi_{ij} - F_j \right) (\Phi_{kj}) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

고려된 구조형상함수 개수만큼의 가중치에 대해서 편미분을 하였기 때문에 미지수의 개수만큼인 n 개의 방정식이 도출되며, 목적함수를 최소화하는 가중치 계수를 산정하기 위해서 식(5)와 같이 각 편미분방정식의 값이 0이 만족되도록 하였다.

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha_k} = 2 \sum_{j=1}^m \left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \Phi_{ij} - F_j \right) (\Phi_{kj}) \right] = 0 \quad (5)$$

위의 식(5)을 정리하면 최종적으로 다음과 같은 식(6)이 도출된다.

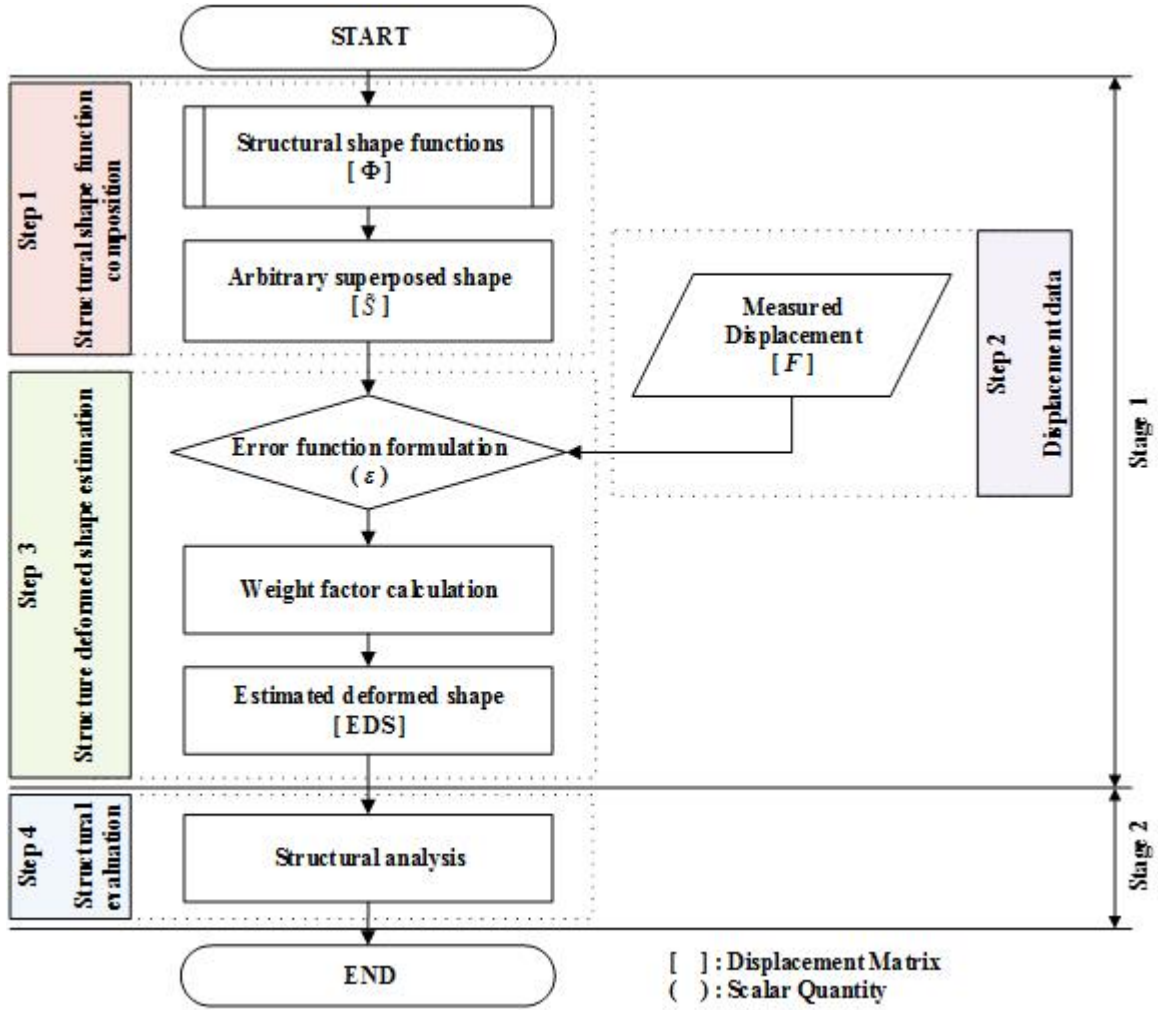


그림 3.13 알고리즘 Flow Chart

$$\therefore \frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha_k} \Rightarrow \sum_{j=1}^m \left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \Phi_{ij} \right) (\Phi_{kj}) \right] = \sum_{j=1}^m [(F_j) (\Phi_{kj})] \quad (6)$$

식(6)과 같은 총 n개의 연립방정식을 풀이하여 최종적으로 목적함수를 최소화하는 값으로 구조형상함수 가중치 계수가 결정된다. 결정된 가중치를 식(1)에 대입하면 구조물의 전체계 거동 형상을 산정 할 수 있다.

다음의 식(7)는 구조물 각 부재의 강성메트릭스를 의미한다. 계측 변위를 이용해서 산정된 구조물 형상을 다음의 식[7]에 대입하면 구조물의 각 부재에 작용하는 내력을 산정 할 수 있다.

$$[f_1] = [k_1][u_1] \quad (7)$$

$$[f_2] = [k_2][u_2]$$

$$\vdots$$

$$[f_m] = [k_m][u_m]$$

where, k : stiffness of member

u : displacement of member

f : internal force of member

이러한 과정을 통해 라이저의 측정된 모션으로부터 라이저의 내력을 계산 할 수 있다. 그리고 이러한 계산과정을 시간에 따라 반복적으로 수행하게 된다면 라이저의 피로 수명을 계산할 수 있다.

다. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

개발된 모니터링 기술의 원리는 매우 간단하다. 구조해석의 기본 원리써 구조물의 모든 자유도의 변위를 알고 있으면 이를 구조해석 모델에 대입하여 구조물의 내력을 산정하는 원리이다. 하지만 현재까지는 변위 측정 개소의 한계로 인해서 이러한 기술의 활용이 어렵다. 향후 구조물 계측 기술이 발달 함에 따라 본 개발 기술의 활용도도 매우 증가 할 것이다.

제4장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 최종목표 달성도

가. 연구개발 수행 진도율

구 분 개발내용	연 구 개 발 기 간												진도 (%)	비고
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
거동해석 알고리즘													100	1 차년 도
해석 프로그램 이론 검증													100	
거동해석 DB 구축													100	
라이저 피로수명 평가 기준													100	
라이저 거동 특성에 따른 피로수명 분석													100	
가속도계 DB구축 및 제원 분석													100	
각속도센서 DB구축 및 제원 분석													100	
모션 추정 알고리즘 개발													100	
모션 추정 정밀도 오차													100	
계측 노이즈에 따른 모션 추정 정밀도													100	

세부연구내용	연 구 개 발 기 간																				진도 (%)	비고
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
모델 업데이트 기법 DB 구축																					100	2 차년 도
모델 업데이트 기법 선정																					100	

세부연구내용	연 구 개 발 기 간																				진도 (%)	비고	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
부분구조 해석 기법 분석																						100	2 차년 도
FE 모델 구축																						100	
라이저 해석 모델 검증																						100	
라이저 내력 해석 기술 개발																						100	
라이저 피로 수명 예측 기술 개발																						100	
라이저 거동 취약부위 예측 기술 개발																						100	
라이저 건전도 모니터링 데이터 신뢰도 분석																						100	

나. 연구개발 목표의 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
라이저 3차원 해석 기술 구축	100%	- 라이저 거동 해석을 위한 Flow Chart 작성 - 라이저 해석을 위한 프로그램 이론 검증 - 다양한 환경조건에서의 라이저 Database구축 - 라이저 피로 설계 기준 분석 - 라이저 거동 특성에 따른 피로 수명 분석
라이저 모션 모니터링 기술 개발	100%	- 가속도, 각속도 센서 Database 구축 및 분석 - 가속도·각속도를 이용한 모션 추정 알고리즘 개발 - 계측 오차에 따른 모션 추정 알고리즘 정밀도 분석
라이저 해석적 모델 구축 기술	100%	- 유한요소 모델 업데이트 기법 DB 구축 - 라이저에 적합한 모델 업데이트 기법 선정 - 라이저 해석을 위한 부분구조해석 기법 분석 - 라이저 비선형 거동 모델 구현을 위한 FEM 해석 모델 구축
라이저 건전도 평가 기술 개발	100%	- 계측 모션을 이용한 내력 해석 기술 제시 - 계측 모션을 이용한 라이저 피로 수명 예측 기술 제시

제2절 연구개발 성과의 효과분석

■ 기술적 효과 분석

현재까지의 라이저 모니터링 기술은 대부분 구조물의 진동 형상에 기반한 해석 기술들이다. 진동 형상에 기반한 해석을 위해서는 구조물이 선형 거동을 한다는 기본 가정을 내포하고 있다. 하지만, 엄밀히 따지자면 라이저는 비선형적 거동 특징이 나타난다. 라이저 끝단이 상부 플랫폼에 연결되어 있어 경계조건이 비선형적 거동 특징이 나타난다. 또한 현수선형 라이저의 경우 TDZ에서의 접촉 문제로 인해 비선형적 거동 특징이 나타난다. 이러한 비선형성을 고려하기 위해서 본 연구에서는 가속도, 회전각을 이용한 라이저 모션 변위 계산 기법을 개발하였다. 이 기법은 구조물의 구조 정보가 필요없이 계측 신호만으로 모션을 계산할 수 있기 때문에 다방면에 적용할 수 있고 적용에 한계가 없다고 할 수 있다.

또한 내력 추정 기술은 구조물의 계측 변위만으로 내력을 추정할 수 있기 때문에 이를 이용하면 피로 수명이나 손상 지점을 예측할 수 있다.

■ 경제적 효과 분석

다음 그림 4.1은 해양 구조물의 설치 시 발생하는 비용의 예시이다. 그림에서 볼 수 있듯이 하루에 3천만원이상의 예산이 필요한 것을 볼 수 있다. 이와 같이 해양 작업 시에는 막대한 금액이 소모된다. 본 연구 성과는 라이저의 상태를 실시간 모니터링할 수 있는 기술이다. 이러한 기술은 사람 및 장비 투입을 절감할 수 있기 때문에 유지관리를 위한 비용 절감 효과를 기대할 수 있다.

Lump sum basis, the prices are quoted in US Dollar.
Based on estimation for Minimum 60 days working case

Section	Description		Unit	Price
				USD
1. Mobilization/ Demobilization - Equipment (Singapore)	Air Dive System Mobilization		1 L.S	5,000
	Air Dive System Demobilization		1 L.S	5,000
	Sub Total Lump sum			10,000
2. Mobilization/ Demobilization - Personnel (Shen Zhen)	Air Diving Crews Mobilization		12 Man	22,800
	Air Diving Crews Demobilization		12 Man	22,800
	Sub Total Lump sum			45,600
3. Daily Rate for Equipments	Air Diving Spread	Working	Day	2,800
		Stand-by	Day	1,400
4. Daily Rate for Personnel For 24 Hr operation based on 1 shift for 6man diving team	Diving Supervisor	2 Man	Day	1,500
	Senior Diver	4 Man	Day	2,700
	Diver	4 Man	Day	2,300
	Tender	2 Man	Day	950
	Daily rate for diving team			7,450

Lump sum basis, the prices are quoted in US Dollar.
Based on estimation for Minimum 17 days working case

Section	Description	Unit	Price USD	
1. Mobilization Singapore to Liwan 3-1 Work Site	DP DSV Spread included in 140 Ton Crane, Poisoning & SAT system w/ HRV(hyperbaric rescue vessel)	1 L.S	800,000	
2. Demobilization Liwan 3-1 Work Site to Singapore		1 L.S	575,000	
3. Daily Rate for DP DSV Spread	DP DSV Spread + SAT System	Day	59,500	
4. Daily Rate For SAT Crews	"seal to seal basis" TBD Cost is Diving Gas Consumable Charge and Sat bonus Charge (Diver for USD 50 / Hr. & Technician for USD 20 / Hr)			
	SUPERINTENDENT	1 MAN	Day	2,500
	SAT SUPERVISOR	2 MAN	Day	4,000
	SAT DIVER	9 MAN	Day	9,900
	AIR DIVER	6 MAN	Day	3,600
	SAT TECH / LSS	2 MAN	Day	2,400
	LST	2 MAN	Day	2,600
	ALST	2 MAN	Day	2,000
	Daily rate for SAT Crews (24 MAN SAT Diving Crews)			27,000
	Daily Fuel, and other consumables etc.			
5. Daily Fuel Consumable	a. Sailing at full speed -28.30m ³ /day (3 main engines)			
	b. Sailing at regular speed -22m ³ /day (2 main engines)			
	c. In DP mode at sea- 7.5-12m ³ /day - though dependant on weather			
	d. In stand-by (drifting) mode at sea - 4m ³ /day (1 main engine)			
	e. Alongside in port - 2m ³ /day (no5 engine) or as 'D' if Crane required as 1 main engine required for this.			

그림 4.1 해양 구조물 설치시의 소모 비용 예시

제5장 연구성과의 활용 및 추가 연구 필요성

제1절 연구성과 향후 활용 방안

■ 국내외 학술발표 및 학술 논문

- 본 연구에서는 향후 활용 가치가 높은 알고리즘과 기법들이 제시 되었다. 본 연구를 통해 개발된 핵심기술들은 각각 요소기술로써 향후 기술 개선 연구가 추가로 진행 될 수 있어 매우 파급효과가 큰 기술들이다. 또한 관련 프로그램도 개발되어 향후 연구 수행의 발판을 마련하였다. 이를 통해 지속적인 학술 발표를 통해 본 연구개발 성과의 중요성을 알리고 신기술을 소개함으로써 개발된 기술의 가치를 증진 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

■ 타산업과의 연계 방안 및 확장 연구

- 본 제안과제는 원천기술 개발을 목표로 해석적 검증 연구를 수행하기 때문에 실험실 규모 또는 실물 검증 연구가 후속 연구로 수행될 수 있다. 또한 수중에서는 센서-데이터 로거간 통신 케이블 설치가 난해하기 때문에 본 연구 결과 실용화를 위해서 센서로부터 취득된 데이터를 데이터 로거로 전송하기 위한 수중 센서 데이터 통신 기술 개발도 함께 확장되어야 한다.
- 본 연구는 총 4개의 연구성과를 도출하였으며, 각각의 연구성과는 타 분야 기술로 확장 적용 될 수 있을 것이다. 연구 목표별로는 해양플랜트 라이저 해석 기술을 확보하여 현재 해양플랜트 Subsea 부분의 설계 기술로 활용 할 수 있을 것이며 모션 모니터링 기술은 라이저 뿐 아니라 다양한 해양구조물 모니터링 분야에 활용할 수 있어 앞으로 사업화 및 기술이전에 대한 밝은 전망이 기대된다.
- 해양 환경은 다른 환경에 비해 매우 극한의 환경이므로 본 연구에서 개발된 모니터링 기술을 다른 산업 분야로 적용이 가능하며 3차원 가속도, 각속도 데이터를 이용한 모션 해석기술은 수중 구조물뿐만 아니라 일반적인 토목 구조물 및 육상 플랜트 구조물 등 다양한 구조물에 적용하여 계측이 가능함
- 기존의 변위 측정기술을 대체 할 수 있는 새로운 기술로도 충분히 활용이 가능 하여 구조물 뿐 아니라 차량, 재난관리 등 다양한 산업에 미래 고부가가치 기술로도 활용이 가능하다.

제2절 추가 연구 필요성

본 연구는 앞절에 설명 하였듯, 기존의 기술 한계를 극복하기 위한 기술로써 여러 가지 핵심 기술들이 개발되었다. 현재 개발된 기술은 프로토타입으로써 정밀도 향상을 위해서는 여러 가지 추가 연구가 수행되어야 한다.

본 연구기관은 연구 종료이후에도 관련된 기술을 개선, 발전시키면서 학술 논문 및 학술 발표를 통해 연구 성과 공유 및 연구 성과 확산에 기여할 것이다.

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술 연구개발사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

