



복합구조 해양라이저의 구조건전성 모니터링

유 용¹ · 제현민² · 박수용³ · 최상현⁴

한국교통대학교 철도시설공학과 석사과정¹, 한국해양대학교 해양건축공학과 석사과정²,
 한국해양대학교 해양공간건축학과 교수³, 한국교통대학교 철도시설공학과 교수⁴

Structural Integrity Monitoring of the Marine Riser with Composite Structure

Yoo, Yong¹ · Jae, Hyunmin² · Park, Sooyong³ · Choi, Sanghyun⁴

¹Graduate Student, Department of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation, Uiwang, Korea

²Graduate Student, Department of Architecture and Ocean Space, Korea Maritime University, Pusan, Korea

³Professor, Department of Architecture and Ocean Space, Korea Maritime University, Pusan, Korea

⁴Associate Professor, Department of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation, Uiwang, Korea

Abstract: As the world energy consumption grows, the interest in marine energy resources is increasing. In excavating such resources, the marine riser which connects the floating structure and sea bed is an essential device. The riser system is often exposed to harsh ocean environment and thus vulnerable to damage. Since the failure of the riser system may cause serious economical loss as well as environmental problem, the structural integrity of the riser is very important. Generally, the riser is an extremely slender structure with a much smaller diameter than a length. Therefore, a structural integrity monitoring methodology for typical buildings and bridges may not be applicable. In this paper, the applicability of a damage identification method for a structure to a marine riser is examined via a numerical example. Also, recent research practices and findings for monitoring the behavior and the structural integrity of the marine riser are examined and summarized.

Key Words: riser, structural health monitoring, damage detection, numerical analysis

1. 서 론

해양은 인간 생활에 유용한 수많은 해양자원과 광대한 해양공간을 제공하는 미래 삶의 터전이다. 특히 해양생물은 총 30여 만종으로 육지에 비해 7배가 많으며, 망간, 니켈, 코발트, 구리를 포함한 4대 전략금속 매장량의 이용 가능 연수가 육지의 경우 41 ~ 112년으로 추정되는 반면, 바다는 188 ~ 11,904년이며, 세계 총 석유 생산량의 30%를 해양 유전에 의존하고 있다(Jung, 2000). 특히 산업의 발달과 함께 해양

석유자원의 개발이 본격화되면서 수심이 얇은 지역에 위치한 유전은 거의 고갈 상태에 이르러 북해의 북부, 북극해 등 환경 조건이 보다 열악한 해역이나 수심 900m 이상의 심해역으로 비중이 옮겨지고 있다. 뿐만 아니라, 4대 전략금속을 비롯한 다양한 광물자원들은 수심 800 ~ 2,500m 범위의 해저사면에 분포한 망간각, 대양의 심해저 평원에 위치한 망간단괴, 심해저 산맥 등에 분포한 해저열수광상 등 고수심 해역에 분포하기 때문에 이와 같은 자원들의 채취를 위한 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있다(Park et al, 2009).

라이저는 해양 개발에 필수적인 구조물로 해저면과

주요어: 라이저, 구조건전성 모니터링, 손상탐지, 수치해석

Corresponding author: Choi, Sanghyun

Department of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do 437-763, Korea

Tel: 070-8855-1654, Fax: 031-462-8205, E-mail: schoi@ut.ac.kr

Received December 18, 2014 / Revised December 28, 2014 / Accepted December 29, 2014

해수면의 플랫폼을 연결하여 광물의 시추, 채취 및 이송, 전기적인 연결, 수압 조절 등의 목적으로 이용되는 긴 파이프형 구조물이다. 심해 라이저의 경우 가혹한 해양환경에 지속적으로 노출되므로 손상의 가능성이 높은 구조물이다. 특히 파동, 상부구조물의 운동, 와류 등에 의한 진동에 따른 피로 파괴가 라이저 파괴의 주요 원인으로 분석되고 있으며(Huang, 2012), 피로와 같은 점진적인 파괴는 지속적인 응답 감시를 통하여 손상을 조기에 탐지할 수 있는 구조건전성감시(SIM, Structural Integrity Monitoring)기술의 적용을 통하여 급작스런 파괴로 인한 피해를 방지할 수 있다(Choi et al. 2010; 2013).

이 연구에서는 라이저의 거동 또는 구조적 건전성 모니터링과 관련하여 수행된 최근의 연구 동향을 분석·정리하고 손상탐지기법의 적용성을 검토하였다. 라이저는 직경에 비하여 길이가 매우 긴 세장구조이며, 일부 라이저는 5,000m 이상의 심해에서 사용되고 있어 건물, 교량 등 일반적인 구조물에 통상적으로 적용되어 온 모니터링 기법을 그대로 적용하기 곤란할 수 있다(Huang, 2012). 이 연구에서는 모드형상에 기반한 손상탐지기법을 적용하여 라이저의 지속적인 구조건전성 모니터링을 위한 시스템 구축의 가능성을 수치해석 예제를 통하여 검토하였다.

2. 라이저의 특성 및 연구동향

라이저는 구조적으로 강성 라이저와 유연 라이저로 분류할 수 있으며, 용도에 따라 시추 라이저와 생산 라이저, 플랫폼 라이저로 분류할 수 있다.

강성 라이저의 재료로는 강재가 주로 사용되고 있으며, 알루미늄 합금 등이 쓰이기도 한다. 이와 같은 재질들은 물에 비해 훨씬 무거우므로 세장체의 특성상 길이에 따라 장력이 변하는 특징을 갖는다.

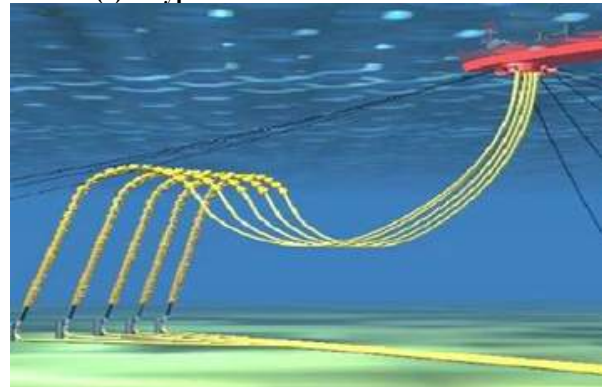
유연 라이저는 해저면 연결부와 상부 구조물 사이에서 자유롭게 걸려있는 유연한 파이프의 부분으로 구성된 새로운 형태의 라이저이다. 나선형으로 감겨져 있는 강재 보강재, 파형강재라이닝(corrugated steel lining), 폴리머충진재(polymer sealant) 및 탄성접착부(elastomeric bonding)를 포함하는 층상구조는 상당한 축방향 강도와 휨유연도를 갖는 파이프를 형성하게 한다(Fig. 1). 유연 라이저는 구조적으로 강성라이저보다 작은 장력이 가해지게 되며, 훨씬 큰 유연한 변형을 하도록 설계된다.

라이저에 관하여 최근까지 수행되어온 연구 흐름은 가장 단순한 형상과 재질을 가진 TTR(Top Tensioned Riser)로부터 시작하여 보다 복잡한 SCR(Steel Catenary Riser)과 유연라이저로 발전되어 왔다. 라이

저의 구조건전성과 관련하여 고려되는 여러 변수 중 가장 중요하게 여겨지는 요소는 와류운동(vortex induced vibration)이 있다. 이와 더불어 라이저의 기능상 반드시 고려하여야 할 내부 유동의 영향에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다.



(a) a typical section of the flexible riser



(b) a flexible riser system

Fig. 1 A Typical Cross Section and System Layout of the Flexible Riser

3. 거동 측정 및 모니터링 사례 분석

심해저 구조물은 복잡한 형태의 파괴모드를 지나치게 허리케인, 쓰나미 등의 자연재해나 극심한 하중에 의하여 무작위로 파단 및 구조적 형상의 변형이 일어나는 급작스런 파괴와 상부구조의 운동, 와류에 의한 진동으로 인한 피로, 부식 등의 긴 주기를 갖는 점진적인 파괴로 분류할 수 있다(Peng et al, 2012). 피로, 부식 등의 점진적인 파괴를 방지하기 위한 SIM기술의 적용을 위해서는 지속적으로 라이저의 거동을 모니터링할 수 있는 시스템의 적용이 필요하다. 라이저의 모니터링과 관련하여 현재까지 적용된 시스템은 크게 거동 측정, 진동 측정 및 변형을 측정 시스템으로 구분할 수 있다.

3.1 거동 측정

라이저의 모니터링에서 플랫폼(platform)의 거동은 라이저 상부의 움직임에 많은 영향을 끼치므로 매우 중요하다. 이러한 플랫폼의 거동은 대부분 6자유도를 갖는 관성항법장치(Inertial Navigation System, INS)와 고정밀위성항법장치(Differential Global Positioning System, DGPS)를 이용하여 측정된다. 외해(Open sea)에서 좋은 신호를 얻는 두 가지 방법으로 DGPS는 주로 허리케인, 쓰나미 등 강한 충격이 가해질 때의 플랫폼의 위치 같은 6자유도계 운동을 모니터링 하는데 사용되는 반면 INS는 부유체의 와류운동과 같은 동적 응답을 측정하는데 사용된다.

Katrina 허리케인 때 Holstein Spar에서와, 겨울철 태풍 때 Atlantis semi-submersible에서 INS 신호를 이용하여 DGPS의 신호를 보정하는 방법으로 거동 모니터링이 실시된 바 있다(Liagre et al., 2008). 모니터링은 2005년부터 2006년에 걸쳐 영국 석유회사인 BP社에서 설치한 부유식 생산 시설(Floating Offshore Installation, FOI)에서 실시되었다. 이때 모니터링에 사용된 장비는 통합 해양 모니터링 시스템(Integrated Marine Monitoring System, IMMS)과 독립 원거리 모니터링 시스템(Independent Remote Monitoring System, IRMS)이다(Fig. 2).

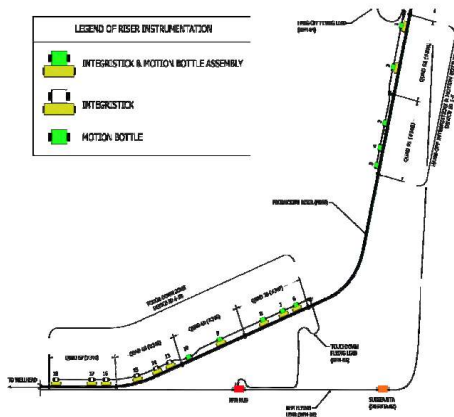


Fig. 2 Layout of the Riser Monitoring System

3.2 진동 측정

해양라이저의 진동 측정에 관한 초기 연구로는 노르웨이의 수심 1300m 해역에서 BP社의 Nyk High의 드릴링 라이저를 전체 스케일에 대하여 1997년 5월부터 7월까지 총 74일 동안 가속도와 변위를 측정하는 사례가 있다(Fig. 3). 라이저의 모니터링을 위하여 2개의 선형 가속도계로 구성된 가속도 모듈 5개와 회전률 측정 장비 2개를 부착하여 측정하였다. 드릴링 라이저

는 총 길이 1,300m이며, 각 측정 지점에서의 시간 이력 가속도 값을 측정하였다. 측정된 가속도를 이용하여 고유진동수 및 모드형상(Fig. 4)을 추출하였다.

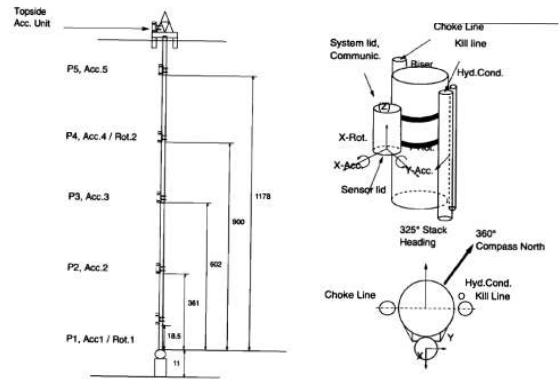


Fig. 3 Layout of the Equipments of the Monitoring System and Sensor Module

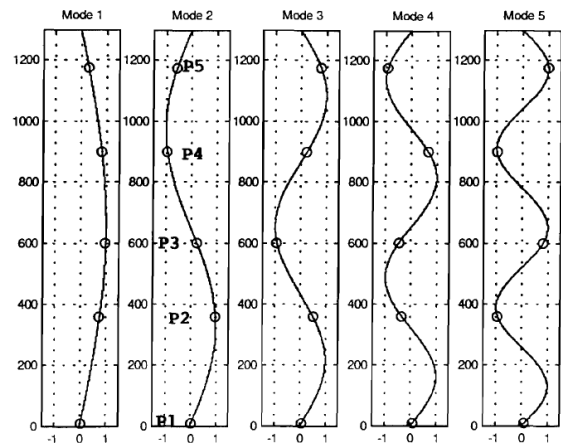


Fig. 4 Mode Shapes of the Riser Pipe

1998년 Howells(Howells, 1998)는 위 연구에 측정된 데이터를 사용하여 AMJIG그룹에서 개발한 드릴링 라이저 건전성 관리 지침에 적용하고 라이저 파이프를 평가하여 기존의 지침을 개선하였다.

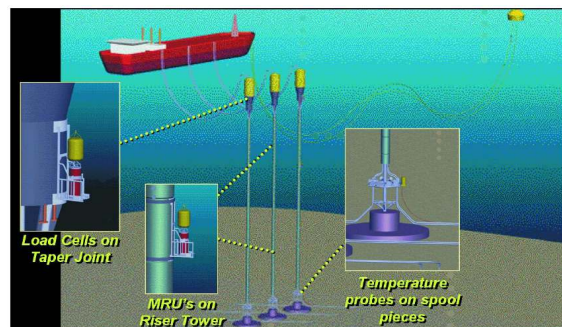


Fig. 5 Layout of the Monitoring Equipments for a Riser Tower

이후 2005년에 Chapin(Chapin, 2005)는 라이저 타워에 대한 모니터링을 실시하였다. 이 연구에서는 파괴양상에 대하여 각각 부력 탱크의 물유입, 코어 파이프의 파괴 라이저 타워 앵커의 파괴로 구분하였고, 1년 동안 중앙타워의 모니터링을 수행하여 지속적으로 데이터를 수집하였다(Fig. 5).

3.3 변형률 측정

라이저의 변형률 모니터링을 위한 최초의 시도는 1998년 Petrobras XVIII Semi-submersible에 설치된 SCR에서 이루어 졌다(Edwards et al, 1999). Petrobras XVIII Semi-submersible은 브라질만 Campos 분지의 Marlim 필드에 수심 910m에 계류되어 있었으며, 10인치의 Steel Catenary Riser를 설치하였다. 1998년 11월 18일부터 데이터를 전송받기 시작하였고, 이 데이터는 Petrobras XVIII로부터 Escondido에 전송되었다. Inconstancy는 스트레인 값의 차이로 구한 모멘트와 정적계이지로 계산한 모멘트로 구하였다. 휨모멘트 값은 보정되어 FPSO로 전송하였다.

이외 스트레인을 이용한 라이저의 건전성 모니터링 연구로는 2Hoffshore 연구소에서 Tahiti 심해 SCR 프로그램으로 변형률-곡률 센서를 개발하고 이를 Fig. 6과 같이 SCR에 배치한 바 있다(Karayaka et al, 2009). 이 연구는 멕시코만 Tahiti field에서 이루어 졌으며, 전체 스케일의 모니터링을 실시하였다. 사용된 모니터링 장비와 위치는 SCR의 거동 특성을 고려하여 선정하였다. 각각의 모니터링 장비는 라이저를 3개의 구역으로 나누어 배치하였다. 라이저에는 4개의 모션센서 6개의 변형률 센서, 6개의 모션 및 변형률 센서를 포함하여 총 16개의 계측 스테이션이 설치되었다(Fig. 7). INTEGRipod 모션 센서는 3축 가속도, 2축 angular rate, 1축 경사계로 구성되어 있으며, INTEGRistick 동적 곡률 센서는 라이저의 피로 파괴의 위험이 큰 부분의 휨 변형률을 측정하였다.

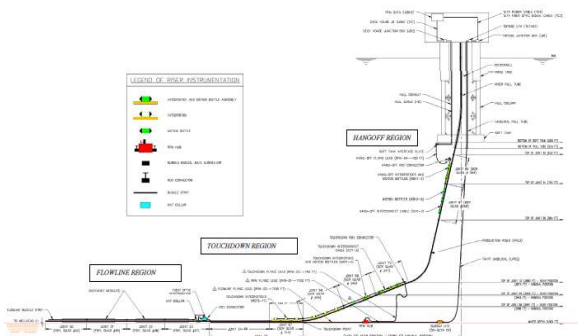


Fig. 6 Monitoring System for the Riser-flow Line



Fig. 7 Motion and Strain Sensors Attached to a Riser

4. 손상탐지 기법

일반적으로 실제 문제에서 유효물성치 산정기법의 적용만으로는 손상의 위치, 정도 등 보다 상세하고 국부적인 정보를 얻기 어려울 경우가 있다. 이러한 원인은 실제 문제에서는 손상의 위치 정보를 나타내기 위하여 필요한 목적응답보다 실제 추출할 수 있는 응답의 수가 적은 ill-condition 상황이 발생하기 때문이며, 이 경우 형상(configuration) 정보를 직접 이용하는 NDD(Nondestructive Damage Detection)기법을 이용하기도 한다. 가장 대표형상 정보로는 모드형상이 있으며, 이외 정적변형형상, 시간영역기대형상(time domain expected configuration) 등이 사용되기도 한다. 이 연구에서는 기존 NDD기법 중 가장 널리 사용되는 방법 중 하나인 Stubbs기법을 적용하였다(Choi et al, 2009). m 개의 요소로 구성된 구조물의 동적응답을 n 개의 위치에서 측정하였다고 가정할 때, 상호독립(mutually independent)인 i 번째 $n \times 1$ 형상벡터 v_i 로 인한 j 번째 요소의 변형에너지, u_{ij} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u_{ij} = \frac{1}{2} v_i^T K_j v_i \quad (1)$$

여기서, K_j 는 j 번째 요소의 국부강성행렬이며, 다음과 같이 요소 j 의 기하학적 요소로만 구성된 행렬 C_j 와 강성파라미터 k_j 로 분리될 수 있다.

$$K_j = k_j C_j \quad (2)$$

구조물 전체의 변형에너지에 대한 j 번째 요소의 변형에너지의 비율(fractional ratio) F_j 은 다음과 같다.

$$F_{ij} = u_{ij} / \sum_{p=1}^m u_{ip} = k_j v_i^T C_j v_i / \sum_{p=1}^m u_{ip} = k_j f_{ij} \quad (3)$$

손상이 발생한 구조물에 대하여 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{ij}^* = u_{ij}^* / \sum_{p=1}^m u_{ip}^* = k_j v_i^{*T} C_j v_i^* / \sum_{p=1}^m u_{ip}^* = k_j^* f_{ij}^* \quad (4)$$

여기서, 위첨자 *는 손상이 발생한 구조물에 대한 파라미터를 나타낸다. 손상 전후의 분율은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$F_j^* = F_j + dF_j \quad (5)$$

식 (5)의 dF_j 를 일차전개(first order expansion)하면 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$dF_j \approx -F_j \alpha_j \quad (6)$$

여기서 강성의 분차(fractional change) α_j 는 다음 식과 같다.

$$\alpha_j = \frac{dk_j}{k_j} = \frac{k_j^* - k_j}{k_j} = \frac{1}{\beta_j} - 1 \quad (7)$$

여기서 β_j 는 손상지수이다. 식(3),(4),(6)를 식(5)에 대입하여 정리하면, 다음과 같은 손상지수에 대한 표현식을 얻을 수 있다.

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} = \frac{1}{2} \left(\frac{f_j^*}{f_j} + 1 \right) \quad (8)$$

식 (8)의 손상지수를 이용하여 발생한 손상의 위치 및 정도를 평가할 수 있다. 손상의 위치는 가설테스트(hypothesis testing)을 이용하여 구할 수 있으며, 손상 인식을 위하여 다음과 같이 두 가지의 가설을 설정할 수 있다.

- H_0 : 부재 j에 손상이 없음
- H_1 : 부재 j에 손상이 있음

가설테스트는 식(8)의 손상지수를 이용하여 수행할 수 있으나, 분차를 이용하므로 지점부 등 변형에너지가 작은 부분에서 오차가 크게 증폭될 수 있으므로

분자와 분모에 각각 1을 더하면 다음과 같이 손상 위치 탐지를 위한 손상지수식을 구할 수 있다.

$$\beta_j \approx \frac{f_j^* + 1}{f_j + 1} \quad (9)$$

가설테스트를 수행하기 위하여 식(9)를 표준화하면 다음과 같다.

$$z_j \approx \frac{\beta_j + \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (10)$$

여기서 μ_β 와 σ_β 는 각각 손상지수 β_j 의 평균과 표준편차이다.

단측꼬리검정(one-tailed test)을 통하여 요소 j의 손상유무는 다음과 같이 결정할 수 있다.

- 만일 $z_j < z_\eta$ 이면 가설 H_0 을 선택
- 만일 $z_j \geq z_\eta$ 이면 가설 H_1 을 선택

여기서 z_η 는 가설테스트의 기준값이며 이 기준값은 가설테스트의 중요도(significance level)에 따라 달라진다. 예를 들어 기준값을 1.5로 정하면 가설테스트는 93%의 신뢰도를 갖게 된다. 손상의 정도는 식 (10)을 통해 결정된 손상 위치에 대하여 식 (8)의 손상지수와 식(7)을 이용하여 산정할 수 있다.

5. 수치해석을 통한 적용성 검토

수치 해석은 상용 프로그램인 OrcaFlex 9.4를 수행하였다. 길이 5,000m의 수직 양광관에 대한 수치해석 모델을 이용하여 자유진동해석을 수행하고, 산정된 모달파라미터를 이용하여 손상탐지 기법의 적용성을 검토하였다.

5.1 수치해석 모델링

상부의 채광선은 OrcaFlex 9.4 프로그램에서 제공하는 기본적인 FPSO 데이터를 사용하였으며, 라이저는 Kim(2010)의 모델에 기초하여 단순한 형태로 바꾸어 모델링하였다. 자유진동해석을 통하여 모달파라미터를 추출하고, 모델을 간략화하기 위하여 buffer active positioning, lifting pump 등은 생략을 하여 길이 5,000m의 수직 양광관 만을 모델링하였다(Fig. 7). Table 1은 해석에 적용된 수직 양광관의 물성치이다.

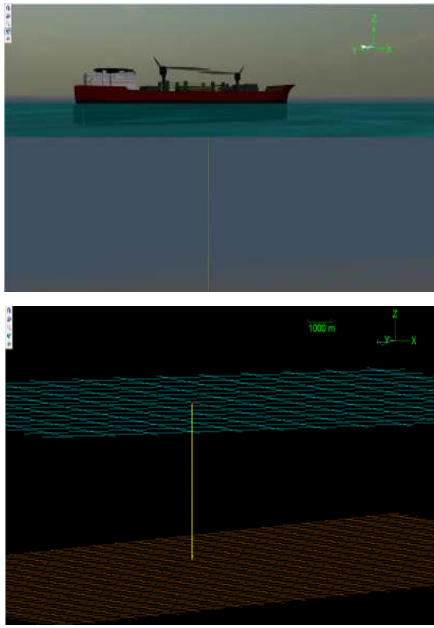


Fig. 7 Numerical Model for the Riser Pipe

Table 1. Modeling Parameters for the Riser Model

Property	Value
length	5,000 m
outer diameter	0.2445 m
inner diameter	0.2005 m
mass density	120 kg/m
axial stiffness (EA)	560 MN
flexual stiffness (EI)	19,800 kN-m ²
torsional stiffness (GJ)	15,221 kN-m ²
drag force coefficient (C _d)	1.0
friction coefficient (C _f)	0.01

수직 양광관은 상부 플랫폼에서부터 원통형 기둥이 내려와 끝단에 부력체가 달려 물속에 떠있는 형상이므로 수치해석모델에서는 자유단으로 고려하였다.

5.2 모의 손상

수직 양광관의 손상 탐지 가능성을 검토하기 위하여 수치해석 모델에 4가지 경우의 손상을 모사하였다. 손상은 5,000m의 양광관을 50m씩 100개의 구역으로 나누어 임의의 구역[요소]의 축강성, 휨강성 및 비틀림강성을 저감시키는 방법으로 모사하였다. 손상부재와 손상도를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 손상 경우 1, 2는 같은 부재에 손상 정도를 변화시켜 손상도에 따른 탐지능력을 검토하였고, 손상 경우 2, 3에서는 다른 부재에 같은 손상을 주어 위치 탐지능력을 검토하였다. 손상 경우 4에서는 두 개의 부재에 같은

손상도를 주어 다수 손상 발생 시의 탐지능력을 검토하였다. Fig. 8은 모사된 손상 위치이다.

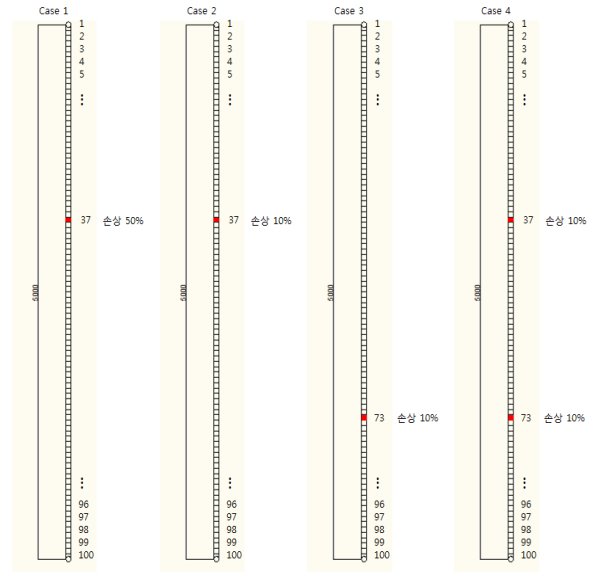


Fig. 8 Damage Locations for each Damage Cases

Table 2. Damaged Elements and Severities for each Damage Case

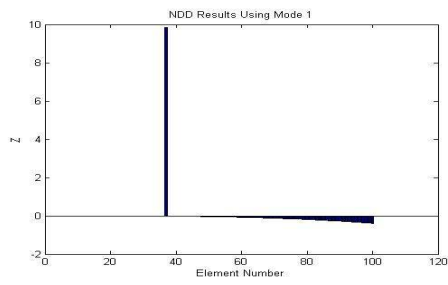
손상 경우	부재 번호	손상도(%)
1	37	50
2	37	10
3	73	10
4	37, 73	10, 10

5.3 수치해석 모델의 손상탐지

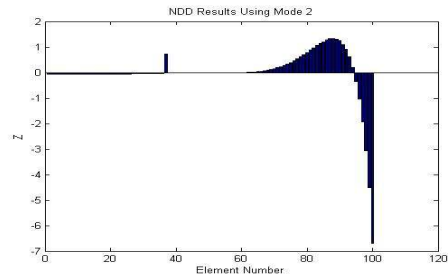
손상 탐지는 손상 전·후 모델에서 추출한 3개의 모드형상을 이용하여 수행하였다. 손상을 추정하기 위한 가설테스트의 기준 값은 3으로 정하여 99%의 신뢰도를 가지는 손상탐지 결과를 추정하였다.

손상 탐지는 각 모드별과 3개의 모드를 합성하여 수행하였다. 3개 모드의 합성은 각각의 모드로부터 구한 손상지수를 산술적으로 평균하여 표준화시킨 결과이다. 손상탐지 결과는 Table 3에 정리하였으며, 이중 손상 경우 1, 4에 대한 탐지 결과만을 각각 Fig. 9 및 10에 나타내었다.

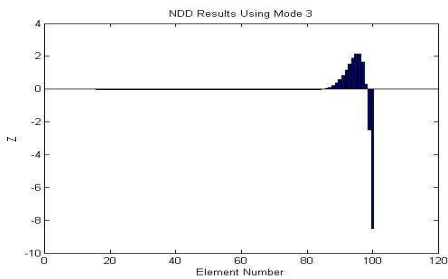
Table 3에서 모든 손상 경우에서 모드형상 1을 이용할 경우 손상 부재를 찾을 수 있으나, 모드형상 2, 3에서는 손상 경우 3과 4를 제외하고는 찾을 수 없었다. 손상 경우 3의 경우 모드형상 1, 2를 이용한 손상탐지에서는 손상을 찾을 수 있었으나, 모드형상 3을 이용한 손상탐지에서는 찾을 수 없었다.



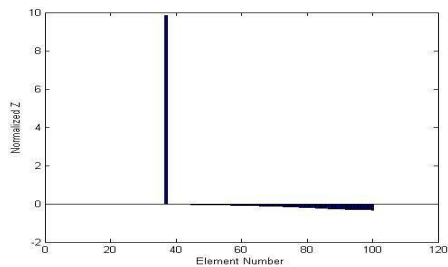
(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3



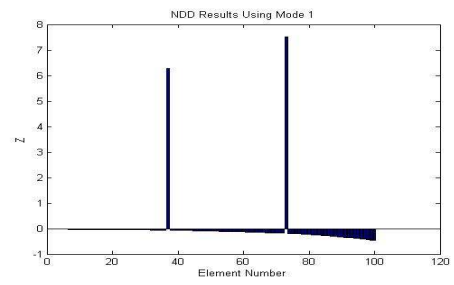
(d) All modes

Fig. 9 Damage Localization Results of Case 1

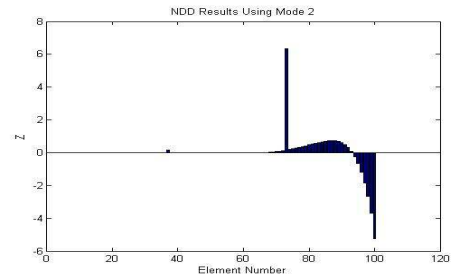
Table 3. Damage Localization Results

(○ localization succeed, × localization failed)

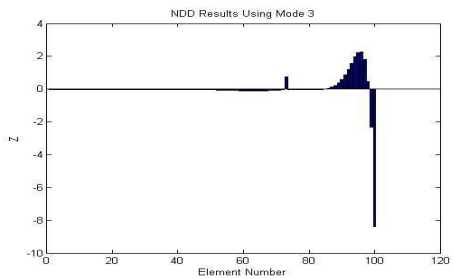
Damage case	Damaged elements	Mode			
		1	2	3	All
1	37	○	×	×	○
2	37	○	×	×	○
3	73	○	×	○	○
4	37	○	×	×	○
	73	○	○	×	○



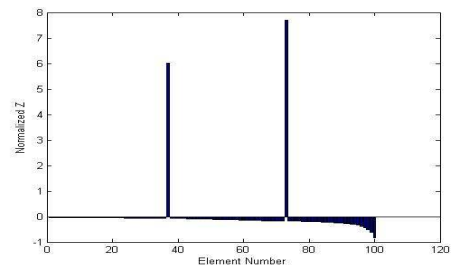
(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3



(d) All modes

Fig. 10 Damage Localization Results of Case 4

하지만 합성 모드를 이용한 손상 탐지에서는 모든 경우에 성공적으로 손상 부재를 찾아내었다.

6. 결론

이 연구에서는 현재까지 개발되어온 해양 라이저의 거동 측정 및 모니터링 사례를 분석하고, 수치해석을 통하여 구조건전성 기법의 적용성을 검토하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) TTR, SCR, 유연 라이저 등 해양 라이저의 구조

적 건전성 모니터링을 위한 시스템이 개발 및 적용된 바 있으며 보다 효과적인 모니터링 시스템에 대한 연구가 지속되고 있다.

(2) 실제 라이저에 적용할 수 있는 모니터링 시스템은 다양한 센서의 조합으로 이루어져야 하므로 관련 시스템의 개발이 필요하며, 시스템의 적용성 검토를 위해 실내 및 실제 현장에서의 실험이 수행되어야 한다.

(3) OrcaFlex 9.4 프로그램을 이용한 라이저 해석 모델 예제를 통하여 손상탐지기법인 Stubbs기법의 적용성을 검토한 결과 개별 모드를 이용한 경우 손상을 탐지하지 못하는 경우도 있었으나, 합성할 경우 모든 손상 경우에 대하여 성공적으로 손상을 탐지할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 해양수산부의 심해저 광물자원 통합 개발 과제(심해저 광물자원 통합채광시스템 개발 연구)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Choi, S. (2009), "Damage Evaluation of a Railroad Bridge Using Time-domain Deflection Shape", *Korean Society for Railway Research*, Vol. 12, No. 2, pp.129-134.
- Choi, S., Park, S., Hyun C. H., Kim, M. S., and Choi, K. R. (2010), "Modal Parameter Identification of a Containment Using Ambient Vibration Measurements," *Nuclear Engineering and Design*, Vol 240, pp 452-460.
- Choi, S., Park, S., Jae, H. M., and Yoo, Y. (2013), "Review of Structural Integrity Monitoring of Ocean Riser Systems", *Proceedings of Korean Society of Ocean Engineer Fall Annual Conference*.
- Edwards, R., Machado, R. Z. and Hennessy, W. F., (1999), "Load Monitoring at the Touchdown Point of the First Steel Catenary Riser Installed in a Deepwater Moored Semi submersible Platform," *Proceedings of Offshore Technology Conference*, OTC-10975. Houston, TX.
- Chapin, G. (2005), "Inspection and monitoring of Girassol hybrid riser towers," *Proceedings of Offshore Technology Conference*, OTC-17696, Houston, TX.
- Howells H, (1998), Deep Water Drilling Riser Technology, VIV & fatigue management, *Drilling Engineering Association (Europe), 4th Quarter Meeting*, Paris.
- Huang, C. (2012). Structural Health Monitoring System for Deepwater Risers with Vortex-induced Vibration: Nonlinear Modeling, Blind Identification Fatigue/Damage Estimation and Local Monitoring using Magnetic Flux Leakage. *Doctoral Thesis*, University of Rice, USA.
- Jung, P. S. (2000), "Knowledge-based Economy and Marine Policy Strategy", report on basic research 2000-01, Korea Maritime Institute.
- Karayaka M., Chen J. and Ruf W., (2009), "Tahiti Online Monitoring System for Steel Catenary Risers and Flowlines", *Proceedings of Offshore Technology Conference*, OTC-19860. Houston, TX.
- Kim, H. W. (2010), "Total Dynamic Analysis of Deep-Seabed Integrated Mining System," *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 34, No. 3 pp. 195-203.
- Liagre, P., Gupta, H., and Banon, H. (2008), "Monitoring of Floating Offshore Installations' Wave Frequency Motions", *Proceedings of Offshore Technology Conference*, OTC-19565. Houston, Texas.
- Park, S. H. (2009), "A Technical and Economic Evaluation of Cobalt-rich Manganese Crusts," *Ocean and Polar Research*, Vol. 31, No. 2, pp. 167-176.
- Peng, R. and Zhi Z. (2012), "A State-of-the-art Review on Structural Health Monitoring of Deepwater Floating Platform," *Pacific Science Review*, Vol. 14, No. 3, pp. 253-263.