

해양플랜트 자켓 구조물의 손상평가

Damage Evaluation of Offshore Jacket Structure

박수용* · 김은혜** · 전용환*** · 김한샘****
Park, Soo-Yong · Kim, Eun-Hye · Jeon, Yong-Hwan · Kim, Han-Sam

요 약

석유 및 천연가스 생산에 사용되는 고정식 해양플랜트에는 자켓 구조물이 가장 많이 사용되고 있다. 생산에 사용되는 자켓 구조물은 풍하중이나 파랑하중에 의해 인명의 피해 없이 변위 및 응력에 대해 안전해야 한다. 그러나 1940년대 후반부터 사용되어 온 자켓 구조물은 피로하중, 노후화로 인해 내구성에 문제가 생기고 있다. 본 논문에서는 자켓 구조물의 안전성을 검토하기 위해 모드형상을 이용하여 자켓 구조물의 손상 위치를 탐색하는 방법을 제시한다. 제시한 손상탐지기법의 효용성을 입증하기 위해 자켓 구조물의 유한요소모델에 임의의 손상을 모사하였다. 유한요소모델의 손상 전 모드형상과 손상 후 모드형상의 모달 변형에너지의 변화를 이용하여 손상 지수를 유도하고 유도한 손상지수를 사용하여 손상이 있는 부재와 손상이 없는 부재를 분류하였다. 연구 결과 손상지수가 '0'인 부재를 제외한 나머지 부재 모두 본 연구에서 제시한 손상탐지기법으로 손상 부재를 판별할 수 있었다.

keywords : 해양플랜트 자켓 구조물, 손상평가, 손상도 지수, 모드형상

1. 서 론

자켓 구조물은 고정식 해양구조물의 대표적인 구조물 형태이다. 자켓 구조물은 1900년대 초기 호수나 해안가에 목재 파일을 박아 사용하던 플랫폼이 발전된 형식으로 1947년 캘리포니아 앞바다 수심 15 m 정도에 설치된 것이 그 시작이다. 이후 자켓 구조물은 멕시코만 해저유전이 개발되면서 본격적으로 사용되기 시작하였다(최경식, 2010). 석유 및 천연가스 생산에 사용되는 자켓 구조물은 폭풍 및 큰 지진이 발생하였을 경우에 변위 및 응력에 대하여 안전해야 한다. 하지만 최근 중국 보하이 만에서 시추정이 쓰러지는 등 1940년대 후반부터 사용되어 온 자켓 구조물의 내구성에 문제가 생기고 있다. 노후화된 자켓 구조물을 안전하게 사용하기 위해서는 자켓 구조물의 손상평가를 통해 안전성을 검토하여야 한다.

본 논문에서는 자켓 구조물의 안전성을 검토하기 위해 진동특성 중 모드형상을 이용하여 자켓 구조물의 손상 위치를 정확하게 탐색하는 방법을 제시한다. 손상위치를 파악하기 위해 가장 중요한 요소는 손상지수이다. 손상지수는 자켓 구조물의 손상 전과 손상 후의 부재 별 모달 변형에너지의 변화를 이용하여 유도하였으며 유도한 손상지수를 바탕으로 손상 위치를 결정하기 위해 패턴인식을 이용하여 손상이 있는 부재와 손상이 없는 부재로 분류하였다. 그룹 분류는 기 개발되어 사용하고 있는 방법을 사용하였다. 마지막으로 앞서

* 정회원 · 한국해양대학교 해양공간건축학과 부교수 sypark@hhu.ac.kr
** 한국해양대학교 해양건축공학과 석사과정 keheyda@naver.com
*** 한국해양대학교 해양건축공학과 석사과정 ninabob4@naver.com
**** 한국해양대학교 해양공간건축학부 학부과정 ssaigeines@cyworld.com

제시한 이론의 효용성을 알아보기 위해 자켓 구조물의 수치적 모델에 임의의 손상을 모사한 후 손상 전과 손상 후의 모드형상 만으로 손상 위치를 파악하였다.

2. 이론

2.1. 손상 지수

$N(j = 1 \dots N)$ 개의 부재로 구성되어 있는 임의의 구조물에서 $NM(i = 1 \dots NM)$ 개의 손상 전과 손상 후의 모드형상을 알고 있다고 가정하면, 구조물의 i 차 모드의 전체 변형에너지 중 j 번째 부재에 편중되어 있는 손상 전의 변형에너지 F_{ij} 는 다음 식과 같고, 손상된 구조물에 대해 대응되는 변수는 별표(*)로 표시하면

$$F_{ij} = \frac{k_j (\Delta_{ij})^2}{\sum_{j=1}^{NE} k_j (\Delta_{ij})^2} \quad (1)$$

$$F_{ij}^* = \frac{k_j^* (\Delta_{ij}^*)^2}{\sum_{j=1}^{NE} k_j^* (\Delta_{ij}^*)^2} \quad (2)$$

와 같다. 여기서, k_j 는 j 번째 부재의 강성, Δ_{ij} 는 i 차 모드에서 j 번째 부재의 상대변위, NE 는 부재의 개수이다. 손상 전 변형에너지와 손상 후의 변형에너지 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$k_j^* = k_j (1 + \alpha_j) \quad (3)$$

손상 전과 손상 후의 관계식에서 α_j 는 j 번째 부재의 손상도를 나타내는 변수로 만일 $\alpha_j = 0$ 이면 손상이 없음을 의미하고, $\alpha_j = -1$ 이면 손상으로 인하여 j 번째 부재의 강성이 완전히 손실되었음을 의미한다. α_j 는 손상 전과 손상 후의 모드형상만으로 표시할 수 있으며, 손상탐지를 위한 손상지수를 손상 전 j 번째 부재의 강성과 손상 후 j 번째 부재의 강성 비로 정의하면, 손상지수 β_j 는 식(3)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} = \frac{\frac{f_{ij}^*}{f_{ij}} + 1}{2} \quad (4)$$

여기서 $f_{ij} = (\Delta_{ij})^2 / \sum_{j=1}^{NE} (\Delta_{ij})^2$ 이고 $f_{ij}^* = (\Delta_{ij}^*)^2 / \sum_{j=1}^{NE} (\Delta_{ij}^*)^2$ 이다.

2.2. 손상탐지 알고리즘

손상지수를 계산한 후 손상 위치를 결정하는 기준은 통계적 이론으로 구할 수 있다. 각 부재로부터 구한 손상지수 값을 확률 변수로 고려하여 표준화된 손상지표를 구하면 다음과 같다.

$$Z_j = \frac{\beta_j - \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (5)$$

여기서, μ_β 는 손상지수의 평균, σ_β 는 손상지수의 표준편차를 나타낸다. 손상 부재를 결정하는데 있어서 마지막 단계는 그룹 분류이다. 그룹 분류를 하기 위해 비교적 이용이 쉬운 Neyman-Pearson 기준(Gibson 등, 1975)을 택하여 사용하였으며, 식(5)에서 구한 Z_j 값으로부터 부재의 손상 여부를 판별 할 수 있으며 기준 값에 따라 신뢰도는 달라진다. 예를 들어 기준 값이 1.5라고 결정하면 신뢰도는 93%의 신뢰도를 가진다.

3. 해석 모델을 이용한 모의 손상탐지

본 논문에서 제안한 손상탐지기법의 효용성을 입증하기 위하여 자켓 구조물의 유한요소모델에 손상을 모사하여 손상 부재를 찾아보았다. 유한요소 모델은 ABAQUS(ABAQUS, 2001)를 이용하여 모델링 하였으며, 자켓 구조물은 총 56개의 Beam Element로 반지름 0.005m 인 강봉으로 이루어졌다. 자켓 구조물의 모델의 치수와 모드형상은 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 총 56개의 부재 각각에 30%의 손상을 모사하여 56가지의 손상경우로 손상 전과 손상 후의 모드형상을 이용하여 손상탐지를 하였다.

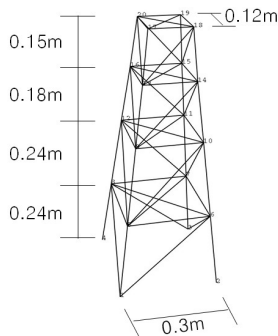


그림 1 자켓 구조물의 치수

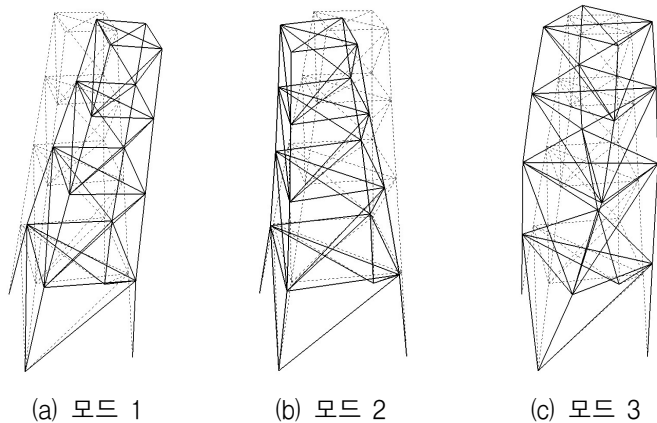


그림 2 자켓 구조물의 모드형상

4. 손상 탐지 결과

총 56가지의 손상 경우에 대한 손상 위치의 추정은 신뢰도 98%의 가설테스트로 $Z_j \geq 2$ 이면 손상이 있다고 판별하였다. 이렇게 구한 Z_j 의 분포도는 그림 3에 나타내었으며 패턴인식 관점에서 그림을 보면 어느 부재에 손상이 발생하였는지 알 수 있다. 각 그림은 개별 모드를 이용한 손상 탐지 결과와 개별모드를 합성하여

구한 결과를 함께 표시하였다. 56개의 손상경우를 손상 탐지한 결과 그림 3과 같이 개별 모드와 종합 모드 모두에서 손상부재를 찾은 경우는 15개로 27%의 성공률을 보였으나 1차 모드의 경우 64%, 2차 모드의 경우 57%, 3차 모드의 경우 30% 로 1차 모드가 가장 높은 성공률을 보였다. 부재 종류별로 살펴보면 수직재의 경우 3차 모드에서는 손상지수가 '0'으로 손상부재를 찾을 수 없었지만 1차 모드와 2차 모드에서는 손상 부재를 찾아낼 수 있었다. 수평재의 경우에는 최상단 수평재를 제외한 모든 부재가 1차 모드에서 손상 부재를 찾아내었다. 수직보강재의 경우는 89%의 성공률로 모든 모드형상에서 손상부재를 탐지하였다.

본 연구에 적용된 손상탐지기법의 손상지수는 손상 전과 손상 후의 부재 별 모달 변형에너지의 변화를 이용하여 유도하므로 수평보강재의 경우와 수직재의 경우를 보면 알 수 있듯이 각 모드별 손상지수가 '0'인 부재는 해당 모드에서 손상부재를 찾을 수 없게 된다. 따라서 손상지수가 '0'인 수평보강재를 제외한 모든 부재가 본 연구에서 제시한 손상탐지기법으로 손상부재를 판별하였다.

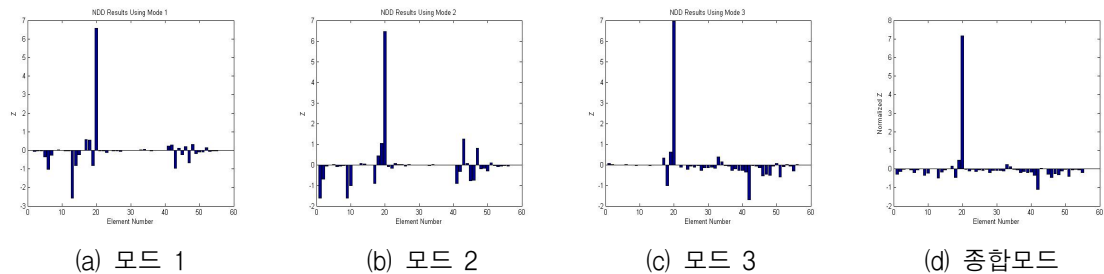


그림 3 손상 된 20번 부재의 손상탐지 결과

5. 결론

본 논문의 목적은 노후화로 인한 자켓 구조물의 손상탐지를 통해 자켓 구조물을 안전하게 사용하는 것으로 구조물의 모드형상을 이용한 손상탐지 기법을 제시하였다. 제시한 손상탐지기법의 효용성을 입증하기위해 유한요소모델을 만들어 임의의 손상을 모사하였고 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 자켓 구조물의 수평보강재를 제외한 모든 부재는 손상 전과 손상 후의 모드형상만으로 손상 부재를 판별할 수 있다. 둘째, 본 논문에 제시한 손상탐지기법에 사용되는 손상 지수는 손상 전과 손상 후의 부재 별 모달 변형에너지의 변화로 유도하기에 모드별 손상지수가 '0'인 부재는 해당 모드에서 손상 부재를 찾을 수 없다. 셋째, 본 연구에서 제시한 손상탐지기법이 실제 구조물에 적용 가능하도록 연구가 필요하다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- 최경식 (2010). **해양플랜트 개론**, 문운당, 서울.
- Gibson, J. D. and Melsa, J. L. (1975). *Introduction to Nonparametric Detection with Applications*, Academic Press, New York.
- ABAQUS Version 6.2 User's Manual (2001). Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, RI.