

모달시험을 이용한 대형 구조물의 손상위치 파악 A Study on the Damage Identification of Large Structure Using Modal Testing

정성진† · 최수현* 진봉만*
Sung-Jin Jung, Su-Hyun Choi and Bong-Man Jin

Key Words : 변형에너지(Strain Energy), 손상지수(Damage Index)

ABSTRACT

This paper presents a theoretical and experimental study on the damage identification of structures. In civil and aerospace, significant work has been done in the area of detecting damage in structures by using changes in the dynamic response of the structure. In this paper a method based on the changes in the strain energy of the structure will be discussed. To evaluate the effectiveness of the method it will be applied to both beam and LNG(liquefied natural gas) carrier.

1. 서론

최근 선박이 대형화에 됨에 따라 운항 및 해상 조건에 의해 받는 파랑하중, 충격하중, 노후화 및 부식 등에 의한 구조물 손상에 대한 연구가 구조적 안전성 확보를 위해 점차 증가되고 있다.

손상의 예측방법에는 크게 육안조사와 비파괴 검사법이 있지만 대형 구조물에 적용하기에는 많은 시간과 비용이 소모된다. 이에 본 연구에서는 구조물 전체 영역에 대해 보다 간편하고 적용하기 쉬운 구조물의 동특성 변화를 이용한 구조물 손상 파악기법을 검토하였다.

구조물의 동특성 변화를 이용한 구조물 손상 파악기법은 구조물이 손상 등으로 물리적으로 변화하면 구조물의 동특성도 함께 변하기 때문에 이들의 관계로부터 손상을 추정하는 방법이다. 이 방법은 비파괴 검사가 어려운 국부적이고 접근이 용이하지 못한 부위와 구조물 전체 부위에 대해서도 가속도계 등의 센서를 이용하여 구조물의 손상을 쉽게 평가할 수 있는 장점이 있다.

하지만 선박과 같은 대형 구조물인 경우 인위적인 가진 적용이 힘들기 때문에 대상물을 별도의 장비로 가진시키지 않고 실제 구조물의 동적거동만을 이용하여 구조물 동특성을 구해야 한다.

이에 본 연구에서는 인위적인 가진 없이 실제 구조물의 동적거동만을 이용하여 구조물의 동특성을 산출하고 이를 통해 얻어진 동특성을 이용하여

구조 손상의 발생 전후에 생기는 변형 에너지의 변화율을 구조물에 발생하는 진동 모드변화의 한 형태로 정식화함으로써, 구조물의 변형에너지변화를 계산하여 구조물의 손상 위치 및 정도를 평가하는 기법을 적용하였다.

2. 변형에너지를 이용한 손상추정

2.1 이론

Bernouli-Euler 보의 변형에너지식을 이용하여 특정모드형상 $\psi_i(x)$ 에 대한 변형에너지를 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$U_i = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (1)$$

여기서, U_i 는 i^{th} 모드의 변형에너지이고 EI 는 보의 굽힘강성이다.

보를 N 개의 요소로 분할할 경우, 식(1)은 i^{th} 모드에 의한 a_j 요소의 변형에너지식으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$U_{ij} = \frac{1}{2} \int_{a_j}^{a_{j+1}} (EI)_j \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 이용하여 전체요소에 대한 i^{th} 모드의 분할요소 변형에너지비는 식(3)으로 정의한다.

† 대우조선해양(주) 선박해양연구소 진동소음 R&D 팀
E-mail : vibjung@dsme.co.kr
Tel : (055) 680-5550, Fax : (055) 680-2142

* 대우조선해양(주) 선박해양연구소 진동소음 R&D 팀

$$F_{ij} = \frac{U_{ij}}{U_i} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1$$

손상 후의 변형에너지도 식(3)과 같이 식(4)로 표현할 수 있다.

$$F^*_{ij} = \frac{U^*_{ij}}{U^*_i} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N F^*_{ij} = 1$$

여기서 윗첨자 *는 손상 구조물의 모드형상을 이용해 계산된 값을 표시한다.

식(3)과 식(4)에서 손상 전후에도 특정요소 $j=k$ 에서의 에너지비가 상대적으로 일정하다고 가정했을 때 손상전후의 변형에너지비는 식(5)로 표현할 수 있다.

$$\frac{(EI)_k \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2}\right)^2 dx}{U_i} = \frac{(EI)^*_k \int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \psi^*_i}{\partial x^2}\right)^2 dx}{U^*_i} \quad (5)$$

식(5)를 손상 전후의 분할 요소의 굽힘 강성비인 식(6)으로 변환할 수 있다.

$$\frac{(EI)_k}{(EI)^*_k} = \frac{\int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \psi^*_i}{\partial x^2}\right)^2 dx / \int_0^l EI \left(\frac{\partial^2 \psi^*_i}{\partial x^2}\right)^2 dx}{\int_{a_j}^{a_{j+1}} \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2}\right)^2 dx / \int_0^l EI \left(\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2}\right)^2 dx} \equiv \frac{f_{ik}^*}{f_{ik}} \quad (6)$$

이때 측정된 모드 수가 m 개일 경우 분할요소 k 에서의 손상지수(damage index)는 식(7)로 정의할 수 있다.

$$\beta_k = \frac{\sum_{i=1}^m f_{ik}^*}{\sum_{i=1}^m f_{ik}} \quad (7)$$

식(7)는 손상추정이 용이한 정규화된 손상지수인 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$Z_k = \frac{\beta_k - \bar{\beta}_k}{\sigma_k} \quad (8)$$

각각의 분할요소에서의 손상지수 β_k 를 계산함으로써 손상의 크기는 물론 손상부위를 추적할 수 있다.

2.2 실험모델에 대한 손상추정

변형에너지를 이용한 손상추정법의 정확성과 문제점 등을 검증하기 위해 Fig.1의 단순보 모델(길이:30cm, 폭:3cm, 두께:0.2 cm)을 이용하여 실험을 수행하였다.

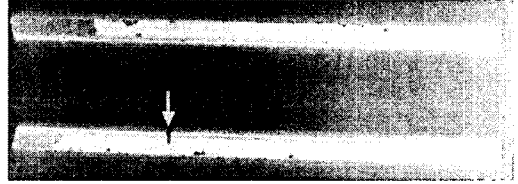


Fig. 1 손상 전후의 단순보 (화살표:손상 위치)

실험은 보를 7개의 요소로 분할하고 임의의 충격 가진에 대한 각 위치별 진동응답만을 계속하여 Fig.2에 나타난 순서대로 정규화 손상지수를 계산하였다.

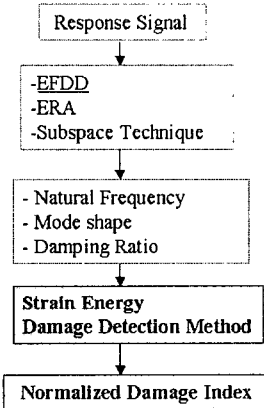


Fig. 2 정규화 손상지수 계산 순서도

여기서 대형구조물에 보다 쉽게 적용하기 위해 EFDD(Enhanced Frequency Domain Method), ERA(Eigensystem Realization Algorithm) 또는 Subspace Technique을 이용하여 구조물의 동특성을 추출하였으며, 그 중 EFDD로 계산한 보의 손상전후 동특성을 Table 1에 나타내었다. 손상 후 고유진동수가 진동모드에 따라 2~6Hz 정도 낮아졌다..

Table 1 단순보의 손상전후의 고유진동수 및 감쇠비

	Natural Frequency [Hz] / Damping [%]	
	Undamaged beam	Damaged beam
1 st mode	32 Hz / 9.2%	30 Hz / 8.8%
2 nd mode	232 Hz / 2.1%	227 Hz / 2.0%
3 rd mode	611 Hz / 1.3%	605 Hz / 1.0%

Fig 3 은 단순보에 대한 손상전후의 진동모드 변화를 나타내었다. 진동모드의 곡률변화는 손상 후가 손상전 보다 다소 크고 고차 모드로 갈수록 그 변화는 커졌으며, 이를 통해 고차 진동모드를 많이 포함할수록 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

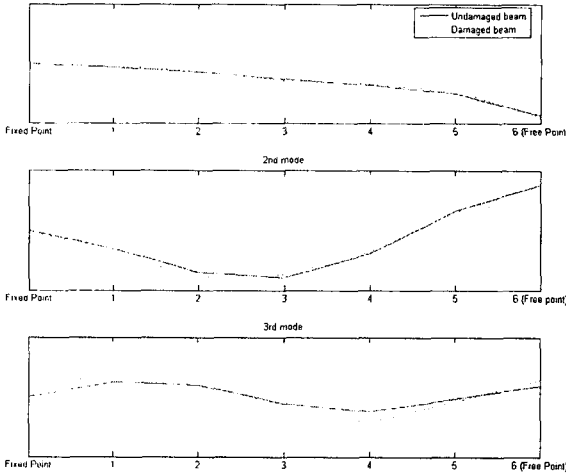


Fig. 3 단순보의 손상전후 진동모드 비교

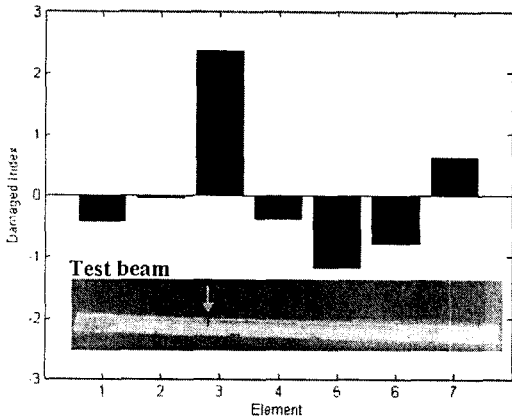


Fig. 4 손상된 보의 정규화 손상지수 추정결과

한편 Fig.4 의 정규화 손상지수는 단순보의 손상위치를 정확하게 나타내었으며, 정규화 손상지수가 2 보다 큰 경우 손상이 발생하였다고 추정할 수 있다.

3. 대형 선박에 대한 손상추정

대형 선박모델에 가상의 손상이 발생한 경우 본 기법을 적용하여 손상을 파악할 수 있는지 검증하기 위해 육안 조사가 어려운 액화천연가스운반선(LNG 선) 화물창(cargo hold)에 대해 손상추정을 수행하였다.

수치해석모델은 Fig.5 에 나타난 전선진동유한 요소모델(길이:287.0m, 폭:43.4m, 높이:26.0m)을 이용하였으며, 수치해석은 Fig.6 과 같이 화물창 2 번과 화물창 3 번 사이 격벽(BHD, bulkhead)에 임의의 손상이 발생하였다고 가정하고 계산하였다.

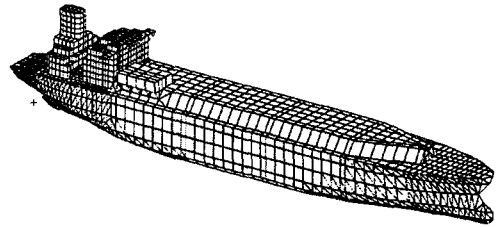


Fig. 5 수치해석모델(LNG)

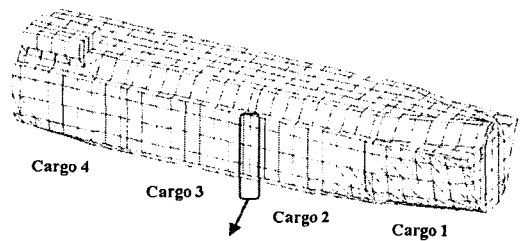


Fig. 6 손상모델 (Cargo 2/Cargo 3 사이의 BHD 에 손상)

손상 전후 모델에 대해 진동모드를 얻기 위해 Nastran 의 Lanzos 법을 이용하여 고유진동해석을 수행하였다. 계산된 진동모드 중 1 차 ~20 차 진동모드만을 이용하여 정규화 손상지수를 계산하였으며 그 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 손상전후의 진동모드를 통해 계산된 변형에너지를 이용하여 정확하게 손상위치를 파악 할 수 있었다.

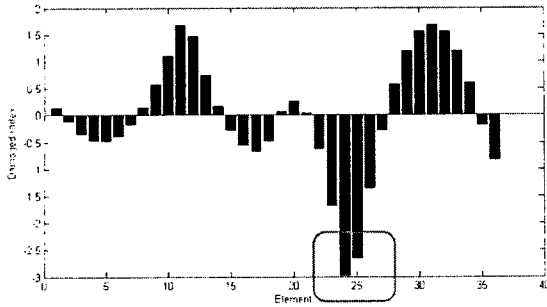


Fig. 7 손상된 화물창의 정규화 손상지수 계산결과

4. 결론

본 연구에서는 구조물에 손상이 발생할 경우 손상전후 진동모드의 변형에너지 변화를 이용하여 구조물의 손상을 추정하기 위해 일련의 해석과 실험을 수행하였다. 이를 통해 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구조물에 대해 손상 전후의 진동모드를 알 수 있다면 이를 이용하여 진동모드 변형 에너지 변화를 추정하여 손상 위치를 정확하게 파악할 수 있다.

(2) 구조물에 손상이 발생할 경우 질량변화보다는 강성 변화가 보다 크게 나타나며 이는 고유진동수 변화를 통해 추정할 수 있다.

(3) 구조물 손상전후의 진동 모드 곡률변화 차이는 고차 진동모드로 갈수록 커진다. 이는 저차 진동모드의 경우 고차 진동모드보다 거동이 단순하므로 손상이 국부적일 경우 큰 영향을 주지 않기 때문인 것으로 판단된다.

(4) 변형에너지를 이용한 손상추적기법은 손상전의 진동모드에 대한 정보가 반드시 필요하다. 하지만 구조물의 진동모드가 복잡하지 않을 경우에 해석적으로 계산된 진동모드와는 큰 차이가 없다고 가정하면, 해석에서 계산된 진동모드를 이용하여 이러한 문제점을 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 정성진, 2005, "Modal Testing 을 이용한 구조물 손상원인 및 위치파악", 대우조선해양 선박해양기술연구소
- (2) Cornwell, P. J., S.W. Doebling, and C.R. Farrar, 1997, "Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures", Proc. of the 15th International Modal Analysis Conference.
- (3) S. W. Doebling, 1997, "Effects of measurement statistics on the detection of damage in the Alamosa canyon bridge", Proc. of the 15th International Modal Analysis Conference.