

정적 변형률을 이용한 플로팅 구조물의 손상탐지

† 박수용 · 전용환*

† 한국해양대학교 해양공간건축학과 교수, * 한국해양대학교 대학원

Damage Detection in Floating Structure Using Static Strain Data

† Soo-Yong Park · Yong-Hwan Jeon*

† Department of Architecture and Ocean Space, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea
* Graduate school of National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 최근 물 가까이에서 생활하고 여가를 보낼 수 있는 친수공간에 대한 욕구가 증가하면서 플로팅 구조물에 대한 관심이 커져가고 있다. 이에 본 연구에서는 정적 변형률을 이용한 플로팅 구조물의 손상탐지기법을 제안하였다. 손상을 탐지하기 위한 손상지수는 기존의 모달 변형에너지에너지를 이용한 손상지수 법을 변형률을 적용할 수 있도록 확장하여 손상 전과 손상 후의 변형률로 나타내었으며, 손상지수 계산 후 손상부위를 결정하는 손상탐지는 패턴인식을 이용하였다. 제안된 이론의 정확성과 타당성은 플로팅 구조물의 축소모형을 제작하고 측정된 변형률 데이터에 적용하여 검증하였다.

핵심용어 : 손상탐지, 손상지수, 정적 변형률, 변형에너지, 플로팅 구조물

Abstract : Recently, people's desire for the waterfront space has been increasing, and more people want to spend their leisure time close to the water. This paper proposes a damage detection technique using the static strain for the floating structure. An existing damage index, in which the modal strain energy was utilized to identify possible location of damage, is expanded to apply the static strain. The new damage index is expressed in terms of the static strains of undamaged and damaged structures. After calculating damage index, the possible damage locations in the structure are determined by the pattern recognition technique. The accuracy and feasibility of the proposed method is demonstrated by using experimental strain data from a scale model of floating structure.

Key words : damage detection, damage index, static strain, strain energy, floating structure

1. 서 론

해양 공간 활용을 통한 국내외 경제활동은 국가 경제발전에도 상당한 기여를 해왔으며, 특히 경제의 발전 및 생활수준 향상에 따라 다양한 개발수요가 증가하고 있으나 토지수용, 환경 문제 등으로 인해 내륙 개발이 어려워지고 있어 연안의 매립을 통한 개발이 증가하여 왔다. 하지만 환경 문제의 대두로 매립에 의한 개발 역시 어려워지는 상황에 있어 환경 친화적이고 쾌적한 해양 공간을 확보하기 위한 플로팅 구조물에 대한 기술개발이 요구되고 있다(송·곽, 2001).

초대형 플로팅 해상구조물에 대한 연구는 미국과 일본을 중심으로 진행되어 왔다. 미국의 경우, 1980년대 후반과 1990년대 초반에 미국 국립과학원에서 초대형 플로팅 해상구조물의 연구를 후원하였으며, 일본은 1995년부터 초대형 플로팅 구조물에 대한 연구를 수행하고 있다. 하지만 아직 우리나라에서는 플로팅 구조물에 대한 연구가 초기 단계에 있으며 플로팅 구조물의 실제 설계 및 시공이 이루어진 예를 찾아보기 힘들다.

부유식 구조물은 주로 콘크리트나 강재로 만들어진 대형 부유체(floating body, pontoon)를 중심으로 계류 및 상부구조로 이루어져 있다. 부유체의 경우 해양의 혹독한 조건에 항시 노출되어 있기 때문에 상시안전도 진단을 통해 구조물의 안전을 확보하여야 하며 손상 위치 및 결함 정도를 파악할 필요가 있다. 특히 구조물에 발생하는 손상은 구조물의 기능저하를 초래할 뿐만 아니라 이를 초기에 발견하고 적절한 조치를 취하지 않으면 대형 사고를 유발할 수 있다.

구조물의 손상을 탐지하기 위한 방법으로 동적 또는 정적인 데이터를 이용하여 많은 연구가 진행되었다. Pandey et al.(1991)은 모드형상의 곡률을 이용하여 캔틸레버보와 단순보에 대한 손상을 평가하였으며, 오·정(1997)은 정적 변위를 이용하여 2경간 연속보와 트러스 구조물의 손상을 탐지하였다. 정(1999)은 손상에 대한 동적특성의 민감도를 이용하여 구조물의 손상을 평가하였고, Choi and Stubbs(1997)는 모달 변형 에너지를 이용하여 바닥 구조물의 손상을 탐지하는 방법을 제시하였다.

Hajela and Soeiro(1990)는 정적변위를 사용한 output error

† 교신저자 : 종신회원, sypark@hhu.ac.kr 051)410-4588

* 연회원, ninabob4@naver.com 051)410-4992

method를 제시하였으며 Law et al.(2005)은 가속도와 변형률 측정을 통해 손상에 대한 두 응답의 민감도를 비교한 바 있다. 또한 최근 광섬유 센서의 발달로 이(2011)는 광섬유센서에서 측정되는 동적 변형률 데이터로부터 구조물의 고유진동수와 변형률 모드형상을 구하고, 이를 이용하여 구조물의 손상을 탐지하는 기법을 제안하였다.

하지만 지금까지 진행된 연구는 주로 일반 육상에서의 구조물이나 교량을 대상으로 수행되었으며, 플로팅 구조물에 대한 연구가 초기 단계에 있는 국내에서는 플로팅 구조물에 대한 손상탐지 기법의 사례는 전무하다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 모달 변형에너지를 이용한 손상지수 법을 변형률을 적용할 수 있도록 확장하고, 플로팅 구조물의 축소 모형을 통해 손상 전과 후에 계측된 변형률 데이터를 이용하여 플로팅 구조물의 손상탐지 성능을 평가하였다.

2. 손상탐지 이론

2.1 손상지수

손상지수 법(damage index method)은 구조물의 질량, 감쇠 및 강성 변화와 모달응답 변화 사이의 민감도 관계를 기반으로 손상에 의한 변형에너지 분포의 변화를 이용하여 손상을 평가하는 방법이다(Choi et al., 2005). 구조물을 구성하는 임의의 요소 혹은 부재 j 의 손상 전·후 강성 비를 나타내는 손상지수 β_j 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} \approx \frac{\sum_{i=1}^{NM} [\Phi_i^T C_j \Phi_i^* + \Phi_i^T K \Phi_i^*] \Phi_i^T K \Phi_i}{\sum_{i=1}^{NM} [\Phi_i^T C_j \Phi_i + \Phi_i^T K \Phi_i] \Phi_i^T K \Phi_i} \quad (1)$$

여기서 k_j 는 요소 j 의 강성을 나타내는 매개변수; NM 은 적용된 고유벡터의 수; Φ_i 는 i 번째 고유벡터; K 는 구조물의 전체 강성행렬; 위 첨자 *는 손상 후의 매개변수; 그리고 C_j 는 다음 관계식으로부터 구할 수 있다.

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

여기서 K_j 는 전체 강성행렬 중 요소 j 의 강성만으로 구성된 행렬이다. 식 (1)에 소개된 손상지수는 고유벡터를 이용하고 있으므로 변형률 데이터를 직접 적용할 수 없다. 이에 본 연구에서는 식 (1)에 제시된 손상지수 표현식에서 유도된 보 구조물에 대한 손상지수 식을 변형률을 적용할 수 있도록 식 (3)과 같이 재구성하였다.

$$\beta_j \approx \frac{[\int_{\Delta L} (w_i^*)'^2 dx + \int_L (w_i^*)'^2 dx] \int_L (w_i)^2 dx}{[\int_{\Delta L} (w_i)^2 dx + \int_L (w_i)^2 dx] \int_L (w_i^*)'^2 dx} \quad (3)$$

본 연구에서는 부유체의 상판 즉 플레이트 구조의 손상을 탐

지하고자 하였으며 실험의 편리성을 위해 플레이트 구조물을 보 구조물의 연속이라 가정하고 보 구조물에 대한 손상지수 식을 유도하였다.

식 (3)에 제시된 손상지수 표현식은 모달응답 외에 정적변위를 포함한 일반적인 변위함수를 적용할 수 있으며(Choi, 1999), 여기서 w 는 연직방향 변위를 나타내며, Euler-Bernoulli 가정에 따라 구조물 단면 내의 변형률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon(x, z) = z [w(x)]'' \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하고 변형률의 측정 위치가 일정하다고 가정하면 변형률을 이용한 손상지수를 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\beta_j \approx \frac{[\int_{\Delta L} (\epsilon_i^*)^2 dx + \int_L (\epsilon_i^*)^2 dx] \int_L (\epsilon_i)^2 dx}{[\int_{\Delta L} (\epsilon_i)^2 dx + \int_L (\epsilon_i)^2 dx] \int_L (\epsilon_i^*)^2 dx} \quad (5)$$

2.2 손상탐지 알고리즘

손상지수를 계산한 후 손상부위를 결정하는 손상탐지는 패턴인식을 이용하여 효과적으로 구할 수 있으며 본 연구에서는 부재 손상의 그룹 분류를 위해 여러 가지의 테크닉을 이용할 수 있으나 비교적 이용이 쉬운 가설테스트를 사용하였으며 다음과 같은 두 가지의 경우의 가설을 설정할 수 있다(박 등, 2004).

- H_0 : 부재 j 에 손상이 없음
- H_1 : 부재 j 에 손상이 있음

가설테스트를 수행하기 위해 식 (5)에서 구한 손상지수를 표준화시키면 다음과 같다.

$$Z_j = \frac{\beta_j - \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (6)$$

여기서 μ_β 와 σ_β 는 각각 손상지수 β_j 의 평균과 표준편차이며, 만일 손상지수의 분포가 정규분포라고 가정하면 표준화된 손상지수의 확률 밀도 함수는 Fig. 1과 같다. 따라서 one-tailed test로 부재 j 의 손상유무를 다음과 같이 결정할 수 있다.

- $Z_j > \eta$ 일 경우, 부재 j 에 손상이 있음
- $Z_j < \eta$ 일 경우, 부재 j 에 손상이 없음

여기서 η 는 가설테스트의 신뢰도를 확률적으로 반영하는 지수이며, 신뢰도는 아래와 같다.

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

- $\eta = 3$ 일 경우, 99% 신뢰도를 가진

사용하였다.

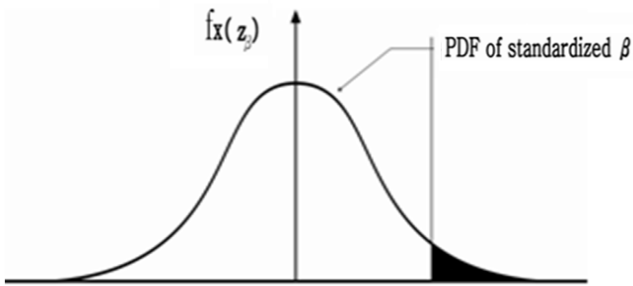


Fig. 1 Probability density function

3. 축소모형 실험

3.1 모델 및 실험장비

실험에 사용된 플로팅 구조물의 축소모형은 800mm×400mm×40mm 의 크기로 제작하였으며, 속을 비워 물에 뜰 수 있도록 하였다. 수조는 실험에 불편함이 없는 1500mm×900mm×500mm 크기로 하여 수조에 물을 절반을 채웠을 때 수조가 벌어지거나 깨지지 않게 고려하여 제작하였다. 계류의 용이성을 위해 T모양의 판을 부유체의 옆면 4곳에 용접하여 붙였으며 추를 올리기 위하여 강봉 및 추 받침대를 제작하여 구조물의 중앙에 용접하였다. 부유체의 재질은 SS400 강판으로 두께는 1mm이다. 축소모형의 모습은 Fig. 2와 같다.

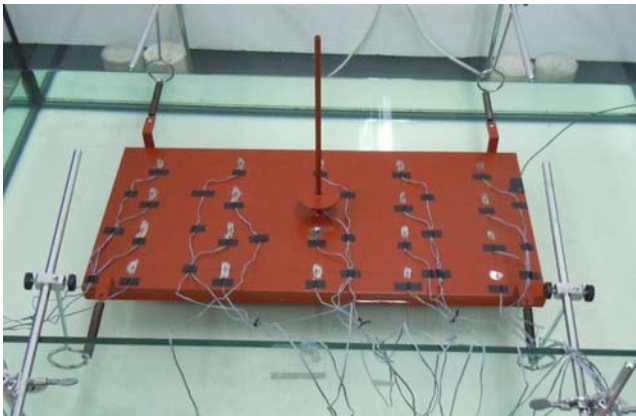


Fig. 2 A test model on water

부유식구조물은 하부구조물을 바다에 띄우고 그 위에 건축물을 엮는 방식으로 수직 움직임은 허용하되 수평 움직임은 제한을 둔다. 이때 수평 움직임을 제한하는 것이 계류 시스템이다.

하지만 실제 계류 시스템과 같은 형상으로 제작하기엔 어려움이 있어 계류 시스템의 역할을 동일하게 하는 인장용수철을 사용하여 수평 움직임을 제한하였다. 실험에 사용된 용수철의 직경은 20mm이며 용수철의 거치대는 Fig. 2와 같이 스탠드를



Fig. 3 Experimental instruments

축소모형의 변형률 측정을 위해 사용된 장비는 Fig. 3과 같이 변형률을 측정할 수 있는 스트레인 게이지, 20개의 스트레인 게이지를 연결할 수 있는 20개 채널의 데이터 로거, 측정 데이터 저장 및 실험 제어를 위한 노트북 컴퓨터를 사용하였다. 실험은 데이터 로거의 채널 개수만큼 구조물 상판을 20개 요소로 나누고 각 요소의 한 가운데 스트레인 게이지를 부착하여 수행하였다. 스트레인 게이지는 변형률의 정확성을 높이기 위하여 방청 페인트를 벗겨낸 후 부착하였다. 스트레인 게이지의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of strain gauge

Type	FLA-5-11-3L
Gauge length	5 mm
Gauge factor	2.11 ± 1%
Gauge resistance	120.4 ± 0.5 Ω

3.2 손상 모사

손상은 Fig. 4와 같이 총 3군데의 임의의 요소에서 손상을 주었으며, 손상은 부재의 단면을 약 40mm 가량 절단하여 손상을 모사하였다. 손상 경우별 손상 부재 및 손상 방법은 Table 2와 같다.

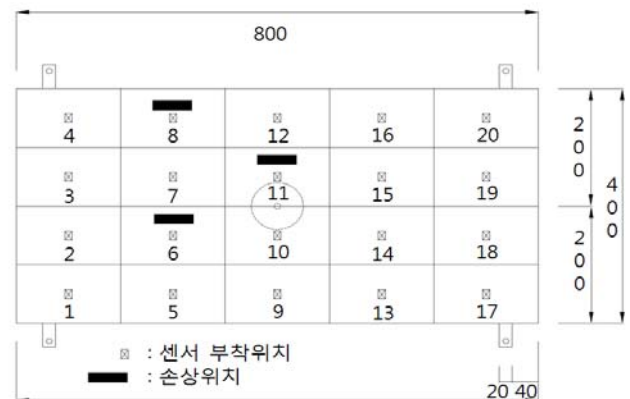


Fig. 4 Damage locations

Table 2 Description of the damage scenarios

손상 경우	부재 번호	손상 방법
1	6	일자 컷팅 4cm
2	8	일자 컷팅 4cm
3	11	일자 컷팅 4cm
4	8,11	일자 컷팅 4cm

손상 경우 2의 경우 손상 전 부재의 변형률은 6번 부재의 손상 후 추를 올렸을 때의 변형률이 되며, 손상 경우 3의 경우 손상 전 부재의 변형률은 8번 부재의 손상 후 추를 올렸을 때의 변형률, 손상 경우 4는 6번 부재의 손상 후 추를 올렸을 때의 변형률이 된다.

3.3 손상 추정

손상을 추정하기 위해 손상 전과 손상 후의 변형률을 각 부재에 대해 측정하고 손상탐지 알고리즘을 통해 손상을 추정하였다. 부재에 변형을 주기 위한 방법으로는 추를 사용하였으며 이때 추는 2kg, 4kg, 5kg의 추를 사용하여 하중 크기별 변형률을 측정하고 손상을 탐지하였다. 5kg 하중에 의한 변형률 데이터를 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 측정된 변형률 데이터에서 알 수 있듯이 손상 부재에서 손상 전과 손상 후의 변형률 값이 크게 바뀌는 것을 알 수 있다.

Table 3 Measured strain for scenarios 1 and 2

단위 : $\mu\epsilon$

부재	손상 경우 1		손상 경우 2	
	손상 전	손상 후	손상 전	손상 후
1	11.4	10.4	10.4	9.5
2	-5.7	-9.5	-9.5	-8.5
3	0.9	0.0	0.0	0.9
4	10.4	9.5	9.5	11.4
5	37	38.9	38.9	41.7
6	-73	-29.4	-29.4	-30.3
7	-59.7	-54.0	-54.0	-64.5
8	52.1	49.3	49.3	32.2
9	74.9	73.0	73.0	74.9
10	-33.2	-33.2	-33.2	-36.0
11	-64.5	-69.2	-69.2	-66.4
12	75.8	75.8	75.8	81.5
13	40.8	41.7	41.7	41.7
14	-53.1	-55.0	-55.0	-58.8
15	-59.7	-65.4	-65.4	-61.6
16	38.9	23.7	23.7	29.4
17	5.7	5.7	5.7	6.6
18	5.7	3.8	3.8	3.8
19	-6.6	-9.5	-9.5	-4.7
20	8.5	6.6	6.6	6.6

Table 4 Measured strain for scenarios 3 and 4

단위 : $\mu\epsilon$

부재	손상 경우 3		손상 경우 4	
	손상 전	손상 후	손상 전	손상 후
1	9.5	8.5	10.4	8.5
2	-8.5	-8.5	-9.5	-8.5
3	0.9	-1.9	0.0	-1.9
4	11.4	10.4	9.5	10.4
5	41.7	41.7	38.9	41.7
6	-30.3	-34.1	-29.4	-34.1
7	-64.5	-68.2	-54.0	-68.2
8	32.2	28.4	49.3	28.4
9	74.9	81.5	73.0	81.5
10	-36.0	-50.2	-33.2	-50.2
11	-66.4	-13.3	-69.2	-13.3
12	81.5	72.0	75.8	72.0
13	41.7	44.5	41.7	44.5
14	-58.8	-71.1	-55.0	-71.1
15	-61.6	-70.1	-65.4	-70.1
16	29.4	29.4	23.7	29.4
17	6.6	3.8	5.7	3.8
18	3.8	1.9	3.8	1.9
19	-4.7	-8.5	-9.5	-8.5
20	6.6	4.7	6.6	4.7

손상탐지 추정 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 그래프로 나타내었다. 여기서 진한 색부분이 손상 부분이다. 추정된 결과의 성능은 false positive error의 비율과 false negative error의 비율로 Table 5와 Table 6에 나타내었다. 이때 손상을 추정하기 위한 가설테스트의 기준 값은 3으로 정하여 99%의 신뢰도를 가지는 결과를 추정하였다. false positive error는 실제 손상이 없는 부재에 손상이 있다고 판정한 경우로 false positive 수를 손상이 없는 부재의 수로 나눈 것이다. false negative error는 실제 손상이 있으나 손상을 찾지 못한 경우로 false negative 수를 손상이 있는 부재의 수로 나눈 것이다. 가장 좋은 경우는 false positive와 false negative 수가 모두 0이 되는 것이며, false positive error 보다는 false negative error가 훨씬 더 중요한 의

Table 5 Percentage of false positive

손상경우		2kg	4kg	5kg
1	개수	0	0	0
	(%)	0	0	0
2	개수	0	0	0
	(%)	0	0	0
3	개수	0	0	0
	(%)	0	0	0
4	개수	0	0	0
	(%)	0	0	0

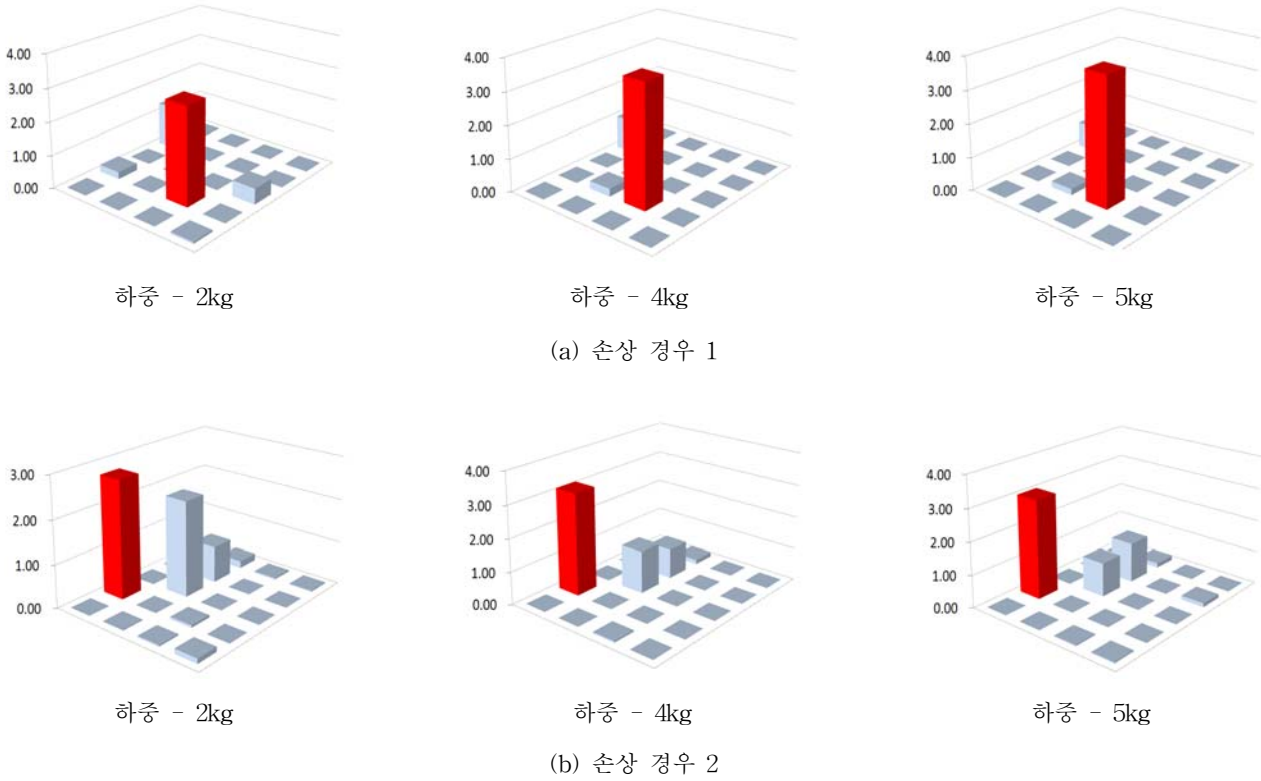


Fig. 5 Damage localization results for damage scenarios 1 and 2

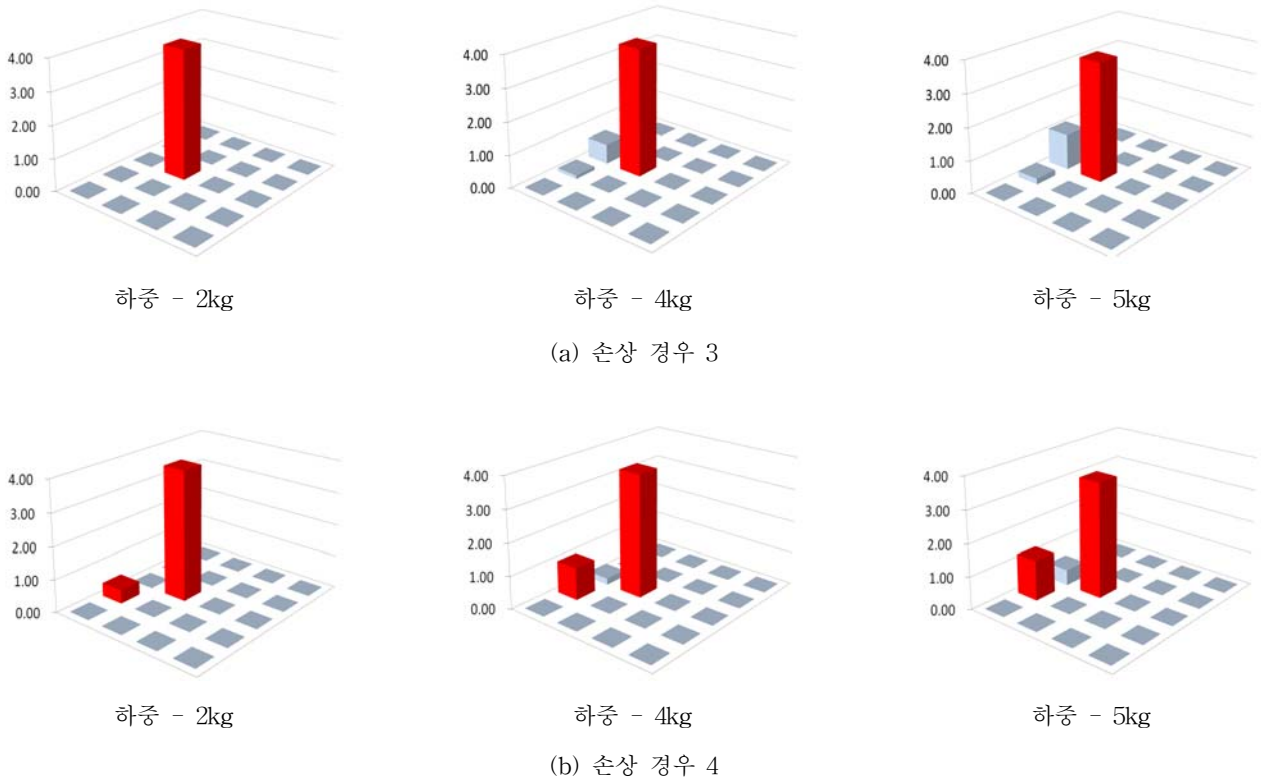


Fig. 6 Damage localization results for damage scenarios 3 and 4

미를 가진다(박 등, 2004).

본 실험에서 하중의 크기가 손상을 탐지하는데 있어 정확도에 영향을 끼칠 것으로 판단하고 2kg, 4kg, 5kg 각각 하중을 다르게 실험하였다. 모든 손상의 경우 false positive error는 0으로 정확하게 탐지하였으나, false negative error에서는 손상경우 1과 2에서 2kg의 하중을 주었을 때 미소한 차이로 손상을 탐지하지 못하였다. 하지만 하중을 증가시키면 손상을 정확하게 탐지하였다.

손상 경우 4의 경우 1개의 부재를 찾지 못하였으나 하중의 크기가 증가함에 따라 표준화된 손상지수의 값이 증가하는 양상을 보였다. 홀수의 이유로 5kg의 하중까지 가할 수 있었으나 더 큰 하중을 가할 경우 손상을 탐지할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 6 Percentage of false negative

손상경우		2kg	4kg	5kg
1	개수	1	0	0
	(%)	100	0	0
2	개수	1	0	0
	(%)	100	0	0
3	개수	0	0	0
	(%)	0	0	0
4	개수	1	1	1
	(%)	50	50	50

4. 결 론

본 연구에서는 고유벡터를 이용한 손상탐지 이론을 변형률을 적용할 수 있도록 확장하고, 이를 이용해 플로팅 구조물의 손상을 탐지하는 알고리즘을 제시하였다. 제안된 방법의 우수성과 효용성을 입증하기 위하여 축소모형을 제작하고 손상 전과 손상 후의 계측 데이터를 통해 플로팅 구조물에 손상탐지 이론이 적용 가능한지 검증하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 본 연구에서 제안된 손상탐지 이론은 플로팅 구조물의 손상부위를 결정함에 있어서 신뢰성 높은 손상 평가 결과를 얻을 수 있다.

2) 정적 데이터를 이용한 플로팅 구조물의 손상탐지는 하중을 가할수록 Z_i 값이 높아지는 양상을 보였다. 홀수의 이유로 하중의 무게를 5kg까지 가할 수 있었지만 하중을 좀 더 늘린다면 좀 더 높은 정확성의 손상탐지 결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

3) 다수의 손상이 있을 경우 변형률이 큰 부재에 비해 작은 부재가 상대적으로 작은 손상위치 추정 값을 도출하고 있다.

후 기

본 논문은 2010년 국토해양부 기술연구개발의 지역기술혁신사업(과제번호: 10지역기술혁신B01)의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 박수용, 최상현, 윤성원, 정광량(2004), “모드 유연성의 변화를 이용한 바다구조의 손상탐지”, 대한건축학회논문집 구조계 02권 5호, pp. 35-22.
- [2] 송화철, 광명하(2001), “초대형 부유식 해상구조물 상부 구조체의 구조해석”, 해양과학기술 논문집 10권 1호, pp. 17-22.
- [3] 오병환, 정범석(1997), “정적변위 및 동특성 측정자료를 이용한 구조물의 손상도 추정”, 대한토목학회논문집 17권 1-3호, pp. 383-396.
- [4] 이종원(2011), “분포형 광섬유센서와 변형률 모드를 이용한 구조물의 손상탐지 기법”, 한국건축학회논문집 27권 2호, pp. 47-54.
- [5] 정연주(1999), “손상에 대한 동특성의 민감도를 이용한 구조물 손상도 평가”, 대한토목학회논문집 19권 1-5호, pp. 649-662.
- [6] Choi, S. and Stubbs, N.(1997), “Nondestructive damage detection algorithms for 2D plates”, SPIE Proceedings: Smart Structures and Materials, Vol. 3043, pp. 193-204.
- [7] Choi, S.(1999), “Improved Performance of Damage Localization and Severity Estimation via Combining Multiple Damage Algorithms”, Texas A&M University, Ph.D. Dissertation.
- [8] Choi, S., Park, S. and Stubbs, N.(2005), “Nondestructive damage detection in structures using changes in compliance”, International Journal of Solids and Structures, 42, pp. 4494-4513
- [9] Hajela, P., and Soeiro, F.J.(1990), “Structural damage detection based on static and modal analysis”, AIAA J., Vol. 28. No. 6, pp. 1110-1115.
- [10] Law, S.S., Li, X.Y., Zhu, X.Q., Chan, S.L.(2005), “Structural damage detection from wavelet packet sensitivity”, Engineering Structures, 27, pp. 1339-1348
- [11] Pandey, A.K., Biswas, M. and Samman, M.M.(1991), “Damage detection from changes in curvature mode shapes”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 226, No. 5, pp. 321-332.

원고접수일 : 2012년 2월 28일
 심사완료일 : 2012년 3월 28일
 원고채택일 : 2012년 3월 29일