

# 최적화 화음탐색법을 이용한 항만 케이슨 구조물의 구조건전성 평가

이소영\* · 김정태\* · 이진학\*\* · 강윤구\*\*

\*부경대학교 해양공학과

\*\*한국해양연구원 연안개발연구본부

\*\*\*삼성물산 건설부문 부산신항민자부두

## Structural Health Monitoring of Harbor Caisson-type Structures using Harmony Search Method

So-Young Lee\*, Jeong-Tae Kim\*, Jin-Hak Yi\*\* and Yoon-Koo Kang\*\*\*

\*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*Coastal Engineering Research Dept., KORDI, Ansan, Korea

\*\*\*Samsung C&T Co., Busan New Port, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Harmony search 화음탐색, Micro genetic algorithm 마이크로 유전알고리즘, Harbor caisson 항만 케이슨, Model update 모델 개선, Damage detection 손상 검색, Natural frequency 고유진동수, Modal-strain energy 모드변형에너지

**ABSTRACT:** In this study, damage detection method using harmony search method and frequency response is proposed. In order to verify this method, the following approaches are implemented. Firstly, damage detection method using harmony search was developed. To detect damage, objective functions that minimize difference with natural frequency and modal strain energy from undamaged and damaged model are used. Secondly, efficiency of developed damage detection method was verified by damage detection of beam structure. And results of harmony search and micro genetic algorithm are compared and evaluated. Thirdly, numerical model was implemented for harbor caisson structure and damage scenario was determined. Lastly, damage detection was performed by proposed method and utility of proposed method is verified.

### 1. 서 론

최근 대규모 항만 건설 및 기존 부두의 리모델링과 같은 해안 공간 구조물 확충사업이 활발하게 진행되고 있다. 특히 부산 신항만의 건설과 함께 계획되고 있는 부산 북항 리모델링 사업을 통해 노후화된 기존의 항만구조물을 어떻게 리모델링하여야 할 것인가에 대한 문제가 제기되고 있다.

또한, 구조물의 설계와 시공 및 유지관리 과정에서의 작은 문제점이 구조 손상을 야기하고, 이는 사고로 이어지게 된다. 특히 대형 구조물의 경우에는 막대한 인명 및 경제적인 손실이 발생하게 된다. 이에 최근 국내·외에서 구조물의 동적 특성(고유진동수, 모드형상, 모드변형에너지 등)의 변화를 감지하여 손상을 추정하는 기법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 기법들 중 구조물의 진동 데이터로부터 얻은 모드 특성과 수치해석 모델로부터 얻은 모드 특성을 비교하고, 최적화 기법을 이용하여 그 오차를 최소화하는 방법으로 손상을 식별하는 연구가 진행되고 있다.

모델기반의 손상검색 기법은 모델개선을 통하여 대상구조물과 해석모델의 동특성을 일치시켜감에 따라 손상을 식별하는 기법이다. 이때, 손상추정에 걸리는 시간 및 정확도는 대개 손

상 추정에 사용된 최적화기법에 따라 좌우된다. 따라서 최적해를 찾는데 걸리는 시간을 줄이고 정확한 해를 구하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 최근에는 최적화 문제를 풀기 위해 자연현상을 모방한 확률론적 탐색 기법이 효과적인 전역해 탐색 성능으로 인해 많이 이용되고 있다.

자연현상을 모방한 대표적인 최적화 기법으로 모사풀림(Simulated annealing; SA), 유전알고리즘(Genetic algorithm; GA), 타부 서치(Tabu search; TS), 그리고 Geem and Kim (2001)에 의해 개발된 화음탐색법(Harmony search; HS) 등이 있다. 그 중에서 모사풀림 기법은 꼭 최적해가 아니라도 어느 정도 좋은 범위에 들면 그 해를 수용함으로써 국부 최적해로부터 벗어날 수 있는 능력을 가지고 있으며(Van Larhoven and Arts, 1987), 타부 서치 기법은 과거의 경험을 축적하고 있다는 특징을 지닌다. 군탐색의 특징을 지니고 있는 유전 알고리즘은 탐색 성능이 우수하고 전역적 최적해 근처까지 빠르게 수렴하지만 정밀한 최적해를 찾는데 시간이 오래 걸리는 문제점을 가지고 있다. 화음탐색 기법은 앞서 언급한 기법의 장점을 모두 지니는 기법으로써 과거의 경험을 축적하고, 해가 어느 정도 좋은 범위에 들면 해를 수용하며, 경험 집합을 이용한 군탐색의 특징을 모두 지니고 있어(이치훈 등, 2006), 그 우수성을 인정받

고 있다.

따라서 본 연구에서는 최적해 탐색 성능이 뛰어난 화음탐색법을 이용하여 케이스식 구조물의 건전성을 평가하는 기법을 제안하였다. 이를 위해 먼저, 화음탐색법을 이용한 구조건전성 평가 기법을 개발하였다. 그리고 보 구조물을 대상으로 손상검색을 수행하여 화음탐색 기법과 유전 알고리즘에 의한 손상검색 결과를 비교/평가하였다. 다음으로, 케이스 구조물에 대한 유한요소모델을 작성하고, 손상 시나리오를 선정하였다. 마지막으로 대상구조물에 대한 수치검증실험을 통해 제안된 기법의 구조건전성 평가 성능을 검토하였다.

## 2. 화음탐색법 기반 손상검색 기법

### 2.1 손상검색문제의 정식화

일반적으로 최적화 기법을 이용한 모델개선 기법은 Fig. 1과 같이 실제 구조물로부터 추출된 모드특징과 해석 모델로부터 계산된 모드특징의 차이가 최소화 되도록 지속적으로 해석모델을 개선하여 손상을 평가한다. 이와 같은 과정은 다음 식 (1)과 같은 최소화 문제로 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } \alpha \\ & \text{Minimize } F(\alpha) = A - B(\alpha), \\ & \text{Subject to } \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 는 부재의 강성변화를 나타내는 설계변수,  $F(\alpha)$ 는 목적함수,  $A$ 는 실제 구조물로부터 취득된 모드 특성치,  $B(\alpha)$ 는 해석 모델로부터 계산된 모드 특성치이다. 이 같은 손상 검색문제는 목적함수에 사용되는 모드 특성치와 해석모델의 신뢰도에 따라 손상평가의 정확도가 좌우되며, 사용되는 최소화 기법에 따라 손상평가 시간을 줄일 수 있다(Routolo and Surace, 1997; 이상열, 2005).

### 2.2 손상검색을 위해 사용된 목적함수

본 연구에서는 목적함수를 구성하는데 있어 고유진동수와 모

드변형에너지를 사용하였다. 고유진동수에 관한 목적함수로써 식 (2)와 같이 실험모델과 해석모델의 손상 전후의 고유진동수 변화율을 일치시키기 위한 함수를 이용하게 된다(Hao and Xia, 2002).

$$f_{\omega}(\alpha) = \sum_{i=1}^{NM} \left( \frac{\delta\omega_{E_i}}{\omega_{E_i}} - \frac{\delta\omega_{A_i}(\alpha)}{\omega_{A_i}} \right)^2 \quad (2)$$

여기서,  $\delta\omega_{E_i}$ 와  $\delta\omega_{A_i}$ 는 각각 실험 모델과 해석모델에 대한 손상 전후의 고유진동수의 변화량을 나타낸다.

모드변형에너지에 관한 목적함수는 식 (3)과 같으며 고유진동수와 모드변형에너지를 동시에 목적함수로써 사용하기 위하여 식 (4)와 같이 고유진동수와 조합한 목적함수를 제안하였다.

$$f_{\theta}(\alpha) = \sum_{i=1}^{NM} \sum_{j=1}^{NP} ([\theta_{A_{ij}} - \theta_{A_{ij}}^*(\alpha)] - [\theta_{E_{ij}} - \theta_{E_{ij}}^*])^2 \quad (3)$$

$$F_1(\alpha) = W_{\omega}f_{\omega}(\alpha) + W_{\theta}f_{\theta}(\alpha) \quad (4)$$

여기서, NP는 데이터 취득 센서 개수이며,  $\theta_{A_{ij}}$ 와  $\theta_{E_{ij}}$ 는 각각 비손상 상태에서의 해석모델과 실험모델에서  $i$ 번째 모드에 대한  $j$ 번째 위치에서의 모드 변형에너지를 나타내며, 위첨자 “\*”는 손상 상태를 위미한다. 또한,  $W_{\omega}$ 는  $f_{\omega}(\alpha)$ 에 대한 가중치이고,  $W_{\theta}$ 는  $f_{\theta}(\alpha)$ 에 대한 가중치이다.

### 2.3 화음탐색법(Harmony search method)

본 연구에서는 손상검색 문제를 풀기 위하여 화음탐색법(Geem and Kim, 2001)을 이용하였다. 화음탐색법은 음악에서 아름다운 화음을 찾는 것과 같이 최적화문제에 대하여 시행착오를 거쳐 최적 화음, 즉 최적해를 찾아낸다. Fig. 2은 화음탐색법의 흐름도이다. 이와 같은 과정에서 다음과 같은 인자들을 사용한다. Harmony memory(HM)는 이제까지 경험했던 화음 중에서 제일 좋았다고 생각되는 화음들을 모은 집합으로 새로이 나타난 화음이 기존의 HM에서의 최악의 화음보다 좋다면 이 화음이 HM에 추가되며 기존의 화음 중 최악의 것은 HM에서 탈락하게 된다. Harmony memory considering rate(HMCR)는 새로운 화음을 만들어 낼 때, HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어 낼 것인지 전체 정의영역에서 무작위로 만들어 낼 것인지를 결정하는 확률이다. Pitch adjusting rate(PAR)는 좋은 화음 즉, 우수한 해를 찾기 위해 기존의 해와 이웃하는 값을 고려함으로써 화음탐색법의 성능을 향상시키는 인자이다.

## 3. 보 구조물의 손상검색

### 3.1 수치모델의 구성 및 손상시나리오

제안된 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여 대상구조물로 양단자유보를 선정하였으며, 수치해석모델은 1차원 오일러-베르누이 보 요소를 이용하여 Fig. 3과 같이 구성하였다. 총 13개의 절점과 12개의 요소로 구성되어 있으며, 절점 당 2개의 자유도를 가지고 있다. 유한요소해석을 위하여 MATLAB 프로그램

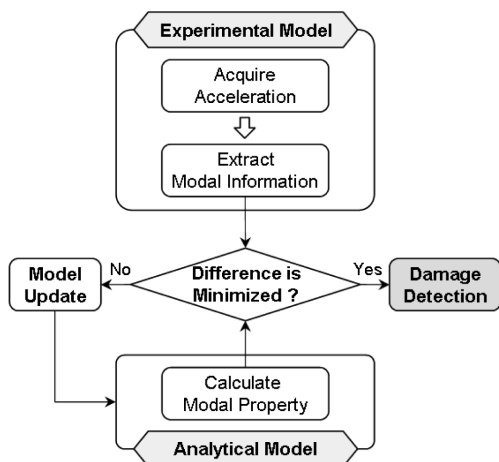


Fig. 1 Course of optimization based damage detection

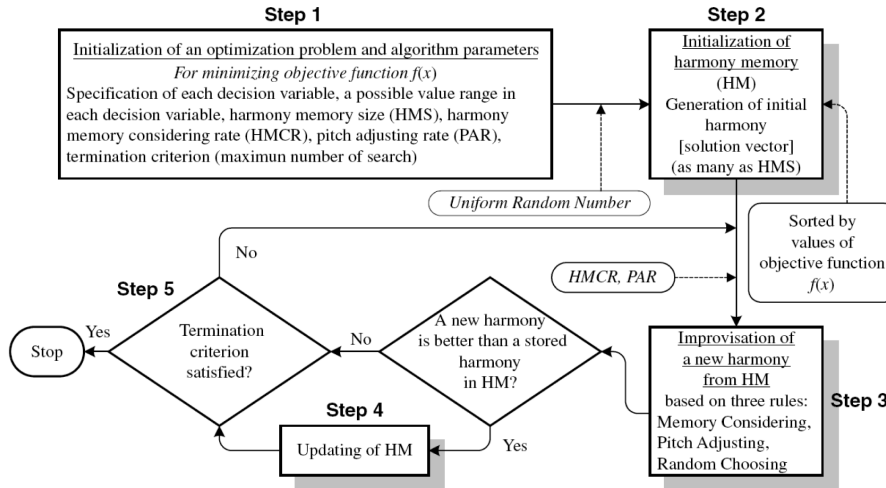


Fig. 2 Optimization procedure of the harmony search algorithm[Lee and Geem, 2005]

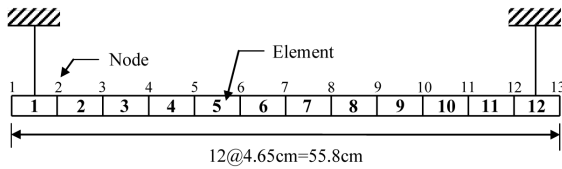


Fig. 3 Analytical model of free-free beam

Table 1 Material property of FE model for beam structure

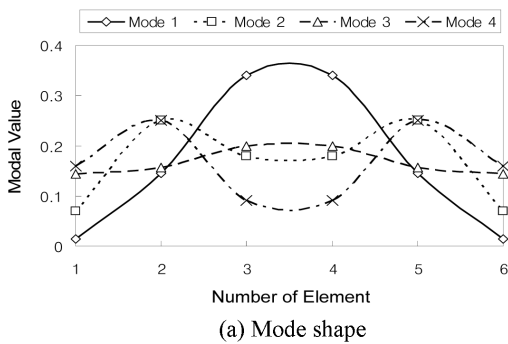
Elastic modulus	70 GPa
Mass density	2,700 kg/m <sup>3</sup>
Moment of inertia	3.33×10 <sup>-9</sup> m <sup>4</sup>
Cross section area	0.0004 m <sup>2</sup>

Table 2 Damage scenario of beam structure

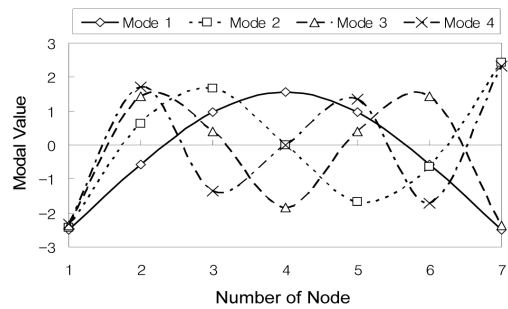
Damage scenario	Damage location	Damage severity
Undamaged	-	-
Damage 1	element 6	20 %
Damage 2	element 12	20 %

Table 3 Natural frequencies of FE model

Damage scenario	Natural frequency (Hz)			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Undamaged	166.90	460.11	902.27	1492.52
Damage 1	162.88	458.87	889.11	1482.73
Damage 2	166.89	459.95	901.28	1488.85



(a) Mode shape



(b) Modal strain energy

Fig. 4 Results of modal analysis with free-free beam

을 사용하였으며, 유한요소 모델에 사용된 재료의 물성치는 Table 1과 같다. 손상시나리오는 Table 2와 같이 2가지의 단일 손상의 경우에 대하여 손상검색을 수행하였다. 고유치해석을 통해 해석모델에 대한 고유진동수 및 모드 형상을 추출하였다.

그 결과는 Fig. 4 및 Table 3과 같다.

### 3.2 손상검색결과 및 분석

화음탐색법을 적용하여 해석모델과 실험모델의 모드 특성치의 변화량이 같아지도록 강성감소계수  $\alpha$ 를 추정함으로써 손상 검색을 수행하였다. 또한, 제안된 기법의 손상검색 성능을 평가하기 위하여 마이크로 유전 알고리즘을 이용한 손상검색 기법과 성능을 비교하였다. 이때, 손상검색 기법의 적용을 위하여 MATLAB 프로그램을 사용하였다.

대부분의 확률론적 탐색기법(GA와 SA 등)에서 탐색조건이 시행착오를 통한 경험적인 지식을 통해 결정되듯이, 화음탐색법

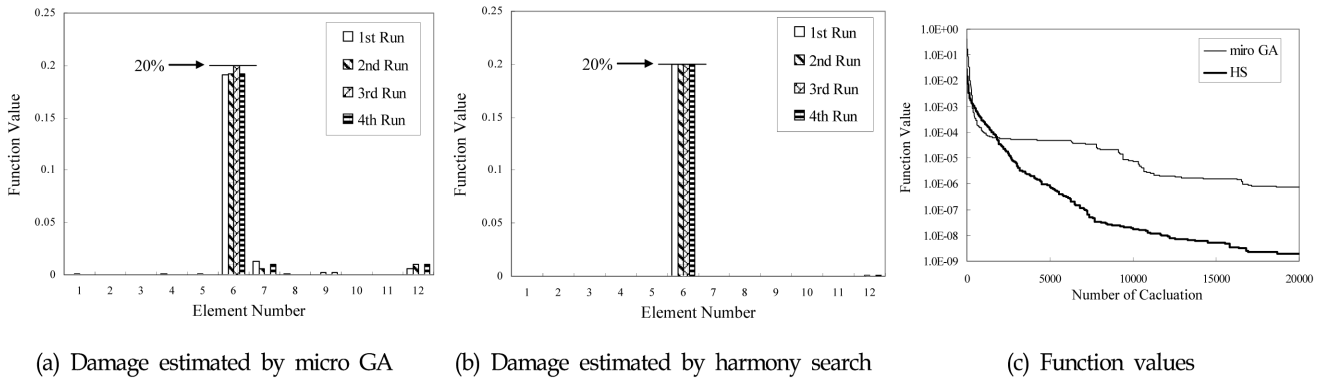


Fig. 5 Damage detection results with beam structure for damage 1

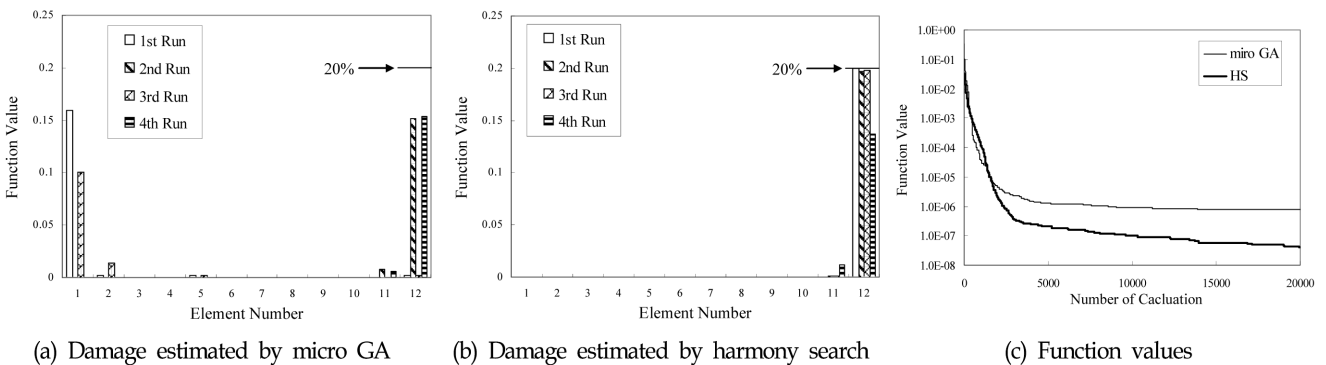


Fig. 6 Damage detection results with beam structure for damage 2

역시 동일하다. 따라서 본 연구에서 화음탐색법에 대한 탐색조건을 Geem and Kim(2001)에 의한 연구를 바탕으로 시행착오 방법을 통하여  $HMCR=0.85$ ,  $PAR=0.35$ 로 설정하였으며,  $HMS$  (harmony memory size) 값은 30으로 설정하였다. 탐색 종료 조건은 추정된 손상도와 엄밀해 사이의 오차가 0.001 이하 일 때 종료하도록 하였으며, 최대 함수계산 횟수는 20,000회로 설정하였다. 마이크로 유전알고리즘에 대한 탐색조건으로써 집단의 크기를 5로 하였고, 종료조건을 4,000세대로 설정하였다. 이는 화음탐색법의 종료조건인 최대 함수계산 횟수 20,000번과 같은 조건이다.

손상검색 결과는 Fig. 5와 Fig. 6과 같으며, 그래프에 실제 손상의 크기(해당 요소의 강성 20% 감소)를 표시하였다. 두 개의 손상에 대한 손상검색 결과가 매번 최적해에 수렴하는지 살펴보기 위하여 각 경우에 대해 4회씩 손상검색을 수행하였다. 손상검색 결과, 손상 1에 대한 결과를 볼 때, 마이크로 유전알고리즘을 이용한 경우, 세 번째에 수행한 결과를 제외한 나머지 결과에서는 최적해에 근접하였으나 정확한 해에는 수렴하지 못하였다. 이는 일반적으로 유전알고리즘이 Fig. 5(c)에서와 같이 최적해 근처에는 급격하게 수렴하나 최적해까지 수렴하는데 있어서는 비효율적인 단점이 있기 때문이다(정대성과 김철영, 2008). 한편, 화음탐색법에 의한 손상검색 결과의 경우, 네 번의 손상검색에 대하여 모두 최적해에 수렴하여 손상의 위치 및 정도를

정확하게 평가하였으며, Fig. 5(c)와 같이, 마이크로 유전알고리즘에 비해 최적해까지의 탐색능력이 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 6(a)에서와 같이 손상 2에 대한 마이크로 유전 알고리즘의 손상검색결과는 손상 1의 결과에 비해 손상의 위치와 정도를 정확하게 예측하지 못하고, 대칭위치에도 손상이 예측되었다. 이러한 현상은 식 (4)에서 고유진동수의 변화가 모드변형에너지에 비해 민감하기 때문에 국부적 최적해에서 벗어나지 못하는 것으로 판단된다. 한편 화음탐색법에 의한 결과에서도 손상 1의 경우에 비해 손상 2의 경우에 대한 손상예측결과가 다소 낮은 정확도를 나타내었지만, 마이크로 유전알고리즘에 의한 결과와 화음탐색법에 의한 결과를 비교해 볼 때, 손상의 위치뿐만 아니라 손상의 정도 면에서도 뛰어난 손상검색 성능을 나타냈다. 이는 역시 Fig. 6(c)에서의 탐색이력 그래프로부터 확인할 수 있다.

#### 4. 케이스 구조물의 손상검색

##### 4.1 수치모델의 구성

보 구조물에 대한 손상 검색 과정을 통하여 검증된 화음탐색법을 사용한 손상검색 기법을 항만 구조물의 손상검색에 적용하기 위하여 대상구조물로서 케이스 안벽 구조물을 선정하였다. 케이스 구조물의 치수는 Fig. 7과 같으며, 이를 바탕으로 유한요

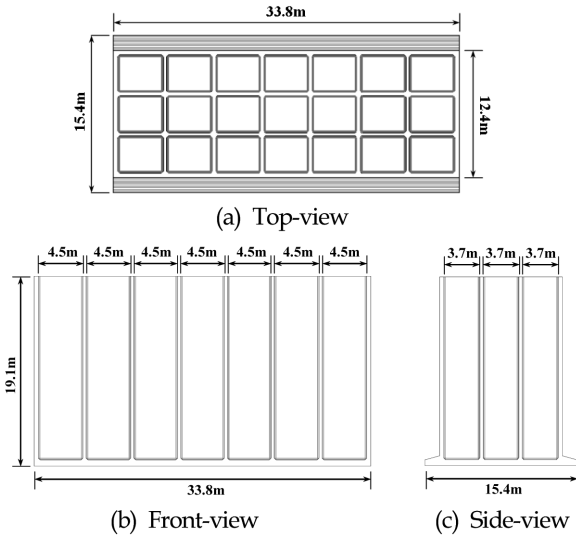


Fig. 7 Dimension of caisson structure

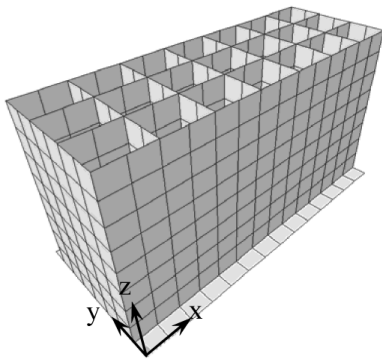


Fig. 8 FE model of caisson structure

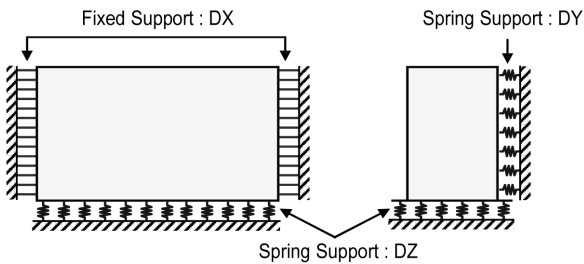


Fig. 9 Boundary condition of caisson structure

Table 4 Material property of FE model for caisson structure

Elastic modulus	$2.61 \times 10^6 \text{ ton/m}^2$
Mass density	$2.5 \text{ ton/m}^3$
Poisson's ratio	0.18

소 모델을 생성하였으며, Fig. 8에 나타내었다. 경계조건으로서 Fig. 9와 같이 케이슨 측면의 X방향 변위 자유도를 구속하고, 저면과 후면의 경계조건으로서 지반 반력계수의 산정결과를 바탕으로 스프링 지점의 강성을 조절하여 적용하였다(이승철, 2005). 이때, 지반탄성계수는  $300\text{kgf/cm}^3$ , 환산계수는 1로 가정

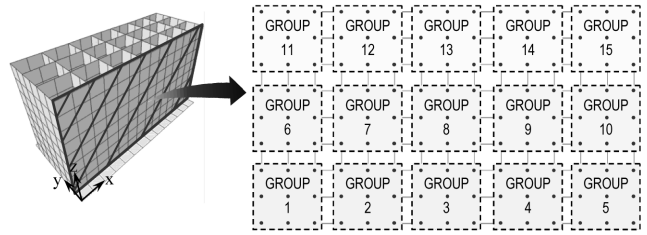


Fig. 10 Spring element group on back wall of caisson structure

Table 5 Damage scenario of caisson structure

Damage scenario	Damage location	Damage severity ( $\Delta K/K$ )
Damage 1	Group 9	45%
Damage 2	Group 11	45%

하였다. 유한요소해석을 위하여 SAP2000 프로그램을 이용하였으며, 케이슨 구조물의 유한요소 모델에 사용된 재료 물성치는 Table 4와 같다.

4.2 손상시나리오

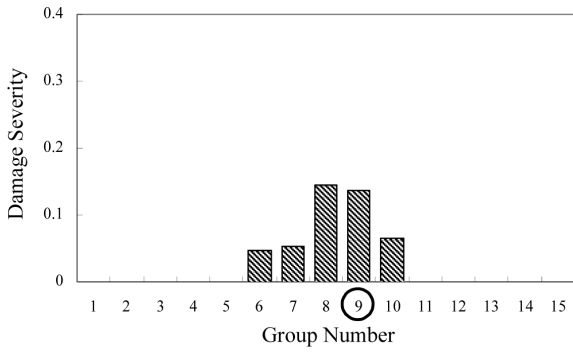
케이슨 안벽 구조물의 손상유형은 세굴에 의한 사석 유실, 콘크리트 염해 및 피고 균열에 의한 구조물 자체의 노후화, 그리고 선박충돌 등의 극치 외력에 의한 손상 등으로 구분된다. 이러한 손상 중 박재형 등(2007)은 평면의 모드변형에너지를 이용한 고유진동수 기반 손상검색 기법을 이용하여 케이슨 구조물 자체의 손상 예측에 관한 연구가 이루어진 바 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치는 세굴에 의해 야기되는 사석의 유실을 손상 시나리오로 고려하였다.

사석의 유실은 크게 기초사석의 유실, 뒤택움의 유실로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 손상시나리오로써 뒤택움의 유실을 고려하였다. 뒤택움 사석이 유실 될 경우 케이슨 후면의 경계조건 변화의 야기한다. 손상을 적용하기에 앞서 Fig. 10과 같이 후면벽에 적용된 스프링 요소들을 그룹화 하였다. 그리고 Table 5와 같이 손상시나리오를 선정하였다. 해당되는 그룹에 대하여 스프링 요소의 강성을 감소시켜 손상을 모사하였으며, 손상검색 기법의 적용을 위하여 MATLAB 프로그램을 사용하였다.

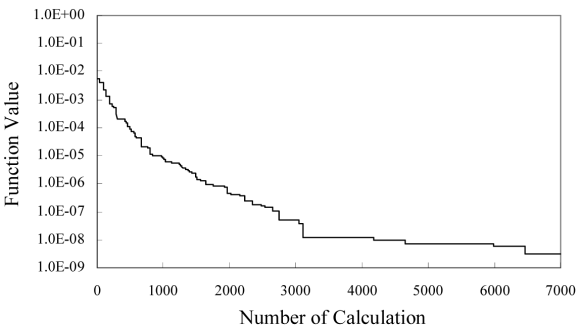
4.3 손상검색 결과 및 분석

항만 구조물의 경우, 접근성이 자유롭지 않기 때문에 계측 센서의 설치 조건 또는 가진 조건 등과 같은 실험 조건에 제약이 따른다. 이는 구조물의 동적특성 파악에 영향을 주고, 계측 가능한 동특성의 일부만을 가지고 손상검색을 수행해야한다. 따라서 본 연구에서는 화음탐색법을 이용한 손상검색 시 목적함수로써 모드 특성치 중 비교적 취점이 용이한 고유진동수만을 사용하였다. 탐색조건은  $HMS=30$ ,  $HMCR=0.85$ ,  $PAR=0.35$ 로 서보 구조물의 탐색조건과 동일하게 설정하였다. 탐색종료조건으로써 최대함수계산 횟수를 7,000회로 설정하였다.

손상검색 결과는 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 손상 1의 경우, 예측된 손상의 위치는 그룹 6~그룹 10 이며, 실제 손상이 포함되어 있기는 하나 정확한 손상의 위치는 알 수 없었으며,

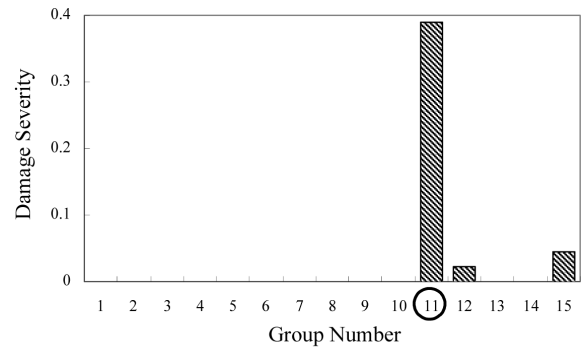


(a) Damage estimated by harmony search

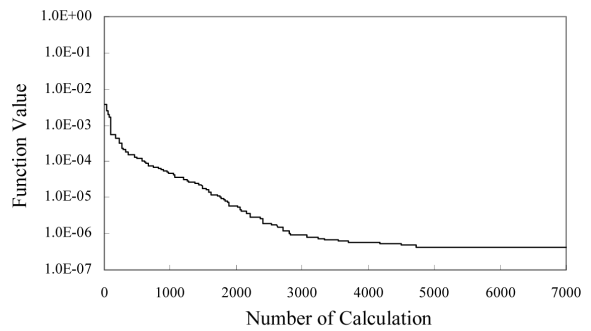


(b) Function values

Fig. 11 Damage detection results with caisson structure for damage 1 (Number of calculation: 7,000)

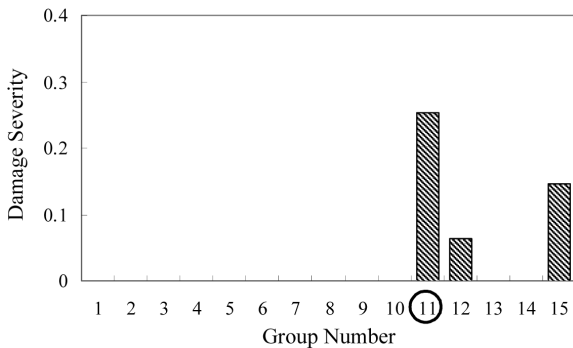


(a) Damage estimated by harmony search

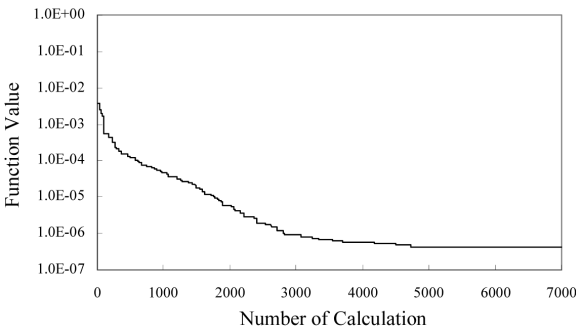


(b) Function values

Fig. 13 Damage detection results with caisson structure for damage 2 (Number of calculation: 50,000)



(a) Detected damage severity by harmony search



(b) Function values

Fig. 12 Damage detection results with caisson structure for damage 2 (Number of calculation: 7,000)

손상의 깊이까지는 예측이 가능하였다. 그리고 Fig. 11(a)와 같은 결과가 나타난 것은 그룹 6~그룹 10 이 비슷한 모드진각도를 갖기 때문이라고 판단된다. 손상 2의 위치는 손상 1의 위치 보다 높은 모드진각도를 갖는 위치로써, 손상검색 결과, Fig. 12에서 보는 것과 같이 역시 정확한 위치는 예측하지 못하였지만 손상의 깊이는 예측이 가능하였다. 손상 2에 대하여 함수계산 횟수를 50,000회로 늘려 손상검색을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 13과 같으며, 손상의 위치를 거의 정확하게 예측하였다. 그리고 해의 수렴과정을 살펴보면 꾸준한 해의 개선을 통해 최적해로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 케이슨식 구조물의 구조건전성 평가를 위하여 최적해 탐색 성능이 뛰어난 화음탐색법을 이용한 손상검색기법을 제안하였다. 이를 위해 먼저, 화음탐색법을 이용한 구조건전성 평가 기법을 개발하였다. 그리고 보 구조물을 대상으로 손상검색을 수행하여 화음탐색법 기반 손상검색기법 성능을 검증하였다. 마지막으로 제안된 기법의 항만 케이스 구조물에 대한 적용성을 평가하였다. 이와 같은 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 화음탐색기법을 이용한 보 구조물의 손상검색 실험을 통하여 손상검색 문제에 대한 화음탐색법의 적용 가능성을 입증하였다.

(2) 손상검색 초기에는 마이크로 유전알고리즘에 의한 결과가 화음탐색기법에 의한 결과에 비해 빠른 수렴속도를 나타내었다.

(3) 손상검색 결과에서는 화음탐색법에 의한 결과가 마이크로 유전알고리즘에 의한 결과보다 손상의 위치 및 정도를 정확하게 예측하였다.

(4) 본 기법을 케이스식 구조물의 손상검색에 적용한 결과, 고유진동수만을 이용한 목적함수를 사용했음에도 불구하고 손상 위치의 예측이 가능하였다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부가 지원하는 항만리모델링 기반구축 연구사업의 일부로 수행되었으며, 연구에 참여한 대학원생들은 BK21 프로그램의 지원을 받았습니다.

## 참 고 문 헌

박재형, 김정태, 나원배, 이진학 (2007). "가속도 응답을 이용한 케이스식 항만구조물의 건전성평가", 한국해양해양공학학회 춘계학술대회 발표논문집, pp 1-4.

박재형, 김정태, 류연선, 이진학 (2006). "고유진동수와 모드변형 에너지를 이용한 향상된 유전알고리즘 기반 손상검색기법", 한국전산구조공학회 논문집, Vol 19, No 3, pp 313-322.

이상열 (2005). "마이크로 유전 알고리즘을 이용한 자유진동 박판구조물의 비파괴 손상 규명", 한국강구조학회논문집, Vol 17, No 2, pp 173-181.

이승철 (2005). 지반-구조물 상호작용을 고려한 케이스 안벽의 지진응답해석, 석사학위, 아주대학교 대학원, p.61.

이치훈, 이주하, 윤영수 (2006). "화음탐색법을 이용한 강섬유 및 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합 설계", 한국 콘크리트학회 논문집, Vol 18, No 2, pp 151-159.

정대성, 김철영 (2008). "하이브리드 유전자 알고리즘과 다중목적함수를 적용한 플레이트 거더교의 격자모델에 대한 유한요소 모델개선", 한국지진공학회 논문집, Vol. 12, No. 6, pp 13-23.

Geem, J.W. and Kim, J.H. (2001). "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search", Simulation Vol 76, No 2, pp 60-68.

Hao, H. and Xia, Y. (2002) "Vibration-Based Damage Detection of Structures by Genetic Algorithm", Journal of Computing in Civil Engineering, Vol 16, No 3, pp 222-229.

Lee, K.S. and Geem, Z.W. (2005). "A New Meta-Heuristic Algorithm for Continuous Engineering Optimization: Harmony Search Theory and Practice", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol 194, pp 3092-3933.

Ruotolo, R. and Surace, C. (1997). "Damage Assessment of Multiple Cracked Beams: Numerical Results and Experimental Validation", Journal of Sound and Vibration, Vol 206, No 4, pp 567-588.

Van Laarhoven, P.J.M. and Arts, E.H.L. (1987). Simulated Annealing: Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers.

2009년 1월 16일 원고 접수

2009년 2월 7일 최종 수정본 채택