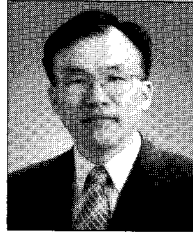


# 합음탐색 최적화기법과 구조식별에의 응용

## Harmony Search Optimization Method and Application to System Identification



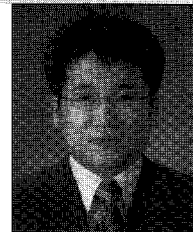
김정태\*



박재형\*\*



이소영\*\*\*



이진학\*\*\*\*

\* 부경대학교 해양공학과 교수  
 \*\* 부경대학교 해양공학과 박사후연구원  
 \*\*\* 부경대학교 해양공학과 박사과정  
 \*\*\*\* 한국해양연구원 연안개발에너지연구부 선임연구원

### 1. 서론

최적화는 본래 응용수학의 한 분야로서 상당기간 연구되어 왔으며 초기에는 수학적 방법으로 주로 함수의 미분 정보를 기반으로 하는 탐색(search)기법이 연구되었다. 산업의 발전과 함께 점차 복잡한 사회문제와 공학적 문제에 최적화 기법을 적용하게 됨에 따라, 현실적으로 만족할만한 수준의 해를 찾는 발견적 기법으로 휴리스틱(heuristic) 기법이 제안되었다. 그러나 휴리스틱 기법은 해결하고자 하는 문제마다 각기 그 특성에 맞추어 모델링해야 하는 어려움이 있다. 이에 따라 지난 수 십년간 다양한 최적화문제에 적용 가능한 메타 휴리스틱(meta-heuristic) 기법이 연구되었다(김여근 등, 2000).

그림 1은 1960년 이후의 메타 휴리스틱 최적화 기법의 개발사를 보여준다. 메타 휴리스틱 기법은 자연 현상 또는 인위적인 조작으로 만든 현상으로부터 착안되었다. 대표적인 기법에는 생물의 진화과정, 즉 다윈이 주장한 자연 선별과 멘델의 유전 법칙을 모방한 유전 알고리즘(genetic algorithm), 물리적인 가열 냉각 현상에서 착안해 개발한 모사풀림(simulated annealing) 기법, 인간의 기억 메커니즘 과정을 이용한 타부서치(tabu search) 기법 등이 있다.

앞서 언급한 최적화 기법들 중 모사풀림 기법은 꼭 최적해가 아니라도 어느 정도 만족스러운 범위에 들면 그 해를 수용함으로써 국부 최적해(local optimum)로부터 벗어날 수 있는 능력을 가지고 있으며(Van Larhoven and Arts, 1987; S. Kirkpatrick et al., 1983), 타부서치 기법은 과거의 경험을

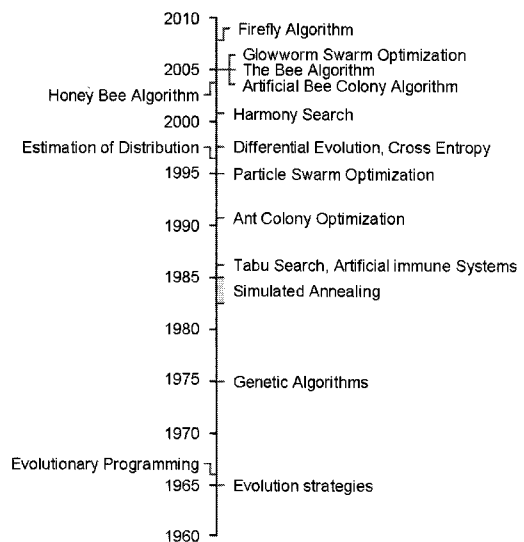


그림 1 메타 휴리스틱 최적화 기법의 개발사

축적하여 이미 경험한 국부 최적해에 다시 빠지는 일 없이 탐색을 계속하게 하는 능력이 있다(Glover, 1977). 군탐색의 특징을 가지고 있는 유전알고리즘은 타 기법에 비해 탐색 성능이 우수하고 전역 최적해(global optimum)의 근처까지 빠르게 수렴하지만 정밀한 최적해를 찾는 데는 오래 걸리는 특징이 있다(Goldberg, 1989).

이상과 같은 최적화 기법들은 인문사회, 공학 등 다양한 분야에서 최적화 문제를 해결하는데 이용되고 있다. 특히, 최근에는 이러한 최적화 기법이 구조물의 안전성을 평가하기 위한 구조식별(system identification) 문제에도 적용되고 있다. 구조식별이란 측정된 구조거동 특성을 토대로 시스템의 해석적 또는 물리적 모형을 추정하는 것으로, 이를 통해 현재 구조물의 거동, 상태 등을 근접하게 나타낼 수 있는 기본 모델(baseline model)을 생성할 수 있다. 이와 같은 구조식별 기법은 구조시스템의 강성 변화에 의한 손상위치의 예측을 위하여 사용되거나, 시간의 경과에 따른 구조계의 평균 강성의 변화를 예측하는 곳에도 이용되고 있다.

구조식별 과정은 측정된 구조거동 특성과 해석적 모델의 거동 특성 사이의 차이를 최소화하는 과정을 말한다. 이때 최소화를 위해 다양한 최적화 기법들이 이용되었으며, 최근에는 메타 휴리스틱 기법의 개발로 인해 유전알고리즘, 모사풀림기법, 인공신경망 기법 등이 적용된 바 있다. Mares와 Surace(1996)은 보 구조물의 손상검색을 위해 유전알고리즘을 이용하였고, 이상열(2005), 박재형 등(2006)은 마이크로 유전 알고리즘을 손상검색 문제에 적용하였으며, 윤정방 등(2004)은 모드기반 교량의 구조식별을 위하여 유전 알고리즘을 이용하였다. Zimmerman과 Lynch(2009)는 모사풀림 기법을 구조식별 문제에 적용하였으며, Wu 등(1992)과 Lee 등(2005)은 패턴인식기반의 인공신경망(neural networks) 기법을 손상검색 문제에 적용하였다.

본 기사에서는 모사풀림, 타부서치, 유전 알고리즘 기법의 장점을 모두 지니는 기법으로 과거의 경험을 축적하고, 해가 어느 정도 좋은 범위에 들면 해를 수용하며, 경험 집합을 이용한 군탐색의 특징을 모두 지니고 있어, 우수한 최적화 성능으로 주목받고 있는 화음탐색법(Harmony Search Method)과 그 성능을 소개하고, 구조식별 분야에서 적용된 사례에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 화음탐색법(Harmony Search Method)

화음탐색법은 국내 연구자인 Geem과 Kim(2001)에 의해 제안된 기법으로 음악가가 완벽한 화음(harmony)을 창조하고자 하는 음악적 행위를 개념적으로 도입시켜 개발된 기법이다.

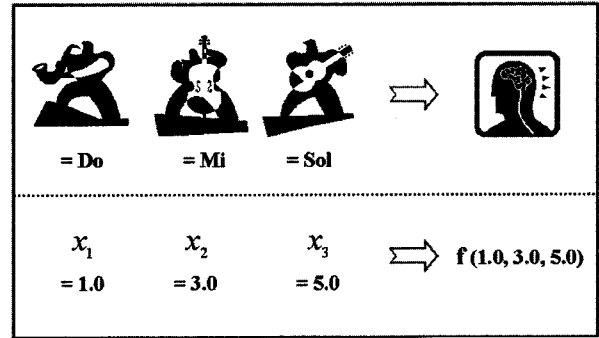


그림 2 음악 연주의 화음창조와 공학적 최적화의 유사성 (Lee and Geem, 2005)

표 1 음악 연주 과정과 최적화 과정의 특징 비교(김정희, 2007)

Comparison factor	Optimization process	Performance process
Best state	Global optimum	Fantastic harmony
Estimated by	Values of variables	Aesthetic standard
Estimated with	Values of variables	Pitches of instruments
Process unit	Each iteration	Each practice

음악에서 화음은 심미적 만족을 고려한 음의 조합이다. 음악가는 아름다운 선율을 창조해내기 위하여 시행착오과정을 거쳐 심리적으로 만족도가 높은 화음을 찾아낸다. 이는 그림 2와 같이 최적화 문제의 최적해(optimal solution)를 구하는 것에 대응될 수 있다. 음악에서의 화음 창조와 최적화 문제에서의 최적해의 도출은 표 1과 같이 대응된다. 음악에서 심미적 표준에 의해 보다 좋은 화음 상태를 찾으려고 시도하는 것과 같이 최적화 과정은 목적함수로 결정된 전역적인 최적해(global optimum)를 찾으려고 시도한다. 각 악기의 높낮이는 심미적 음질을 결정하는 것처럼 각 변수의 열은 목적함수의 값을 결정한다. 또한 음의 심미적 상태의 결정은 연습의 연습으로 개선할 수 있는 것처럼 보다 좋은 목적함수의 값을 얻기 위해 무수한 반복으로 개선할 수 있다(김정희, 2007).

화음탐색법에서는 최적해를 찾기 위하여 몇 가지의 인자들을 사용한다. 이때 사용되는 인자로는 harmony memory(HM), harmony memory considering rate(HMCR), pitch adjusting rate(PAR) 등이 있다. HM은 최적해 탐색과정 중 경험했던 화음 중에서 가장 좋았다고 생각되는 화음들을 모은 집합이다. 만약 새롭게 나타난 화음이 기존의 HM에서의 최악의 화음보다 좋을 경우 새로운 화음은 HM에 추가되고 기존의 화음 중 최악의 것은 HM에서 탈락한다. 이때 HM에 기억되는 화음의 개수는 사용자에게 의해 결정될 수 있다. HMCR은 새로운 화음을 만들어 낼 때 HM에 있는 화음을 바탕으로 만들어낼 것인지 전체 정의영역에서 무작위로 만들어 낼 것인지를 결정하는 확률이다. HM에 새로운 화음을 추가할 때, 발생시킨 난수(random number)가 HMCR값 보다 크면 전체 정의영역에

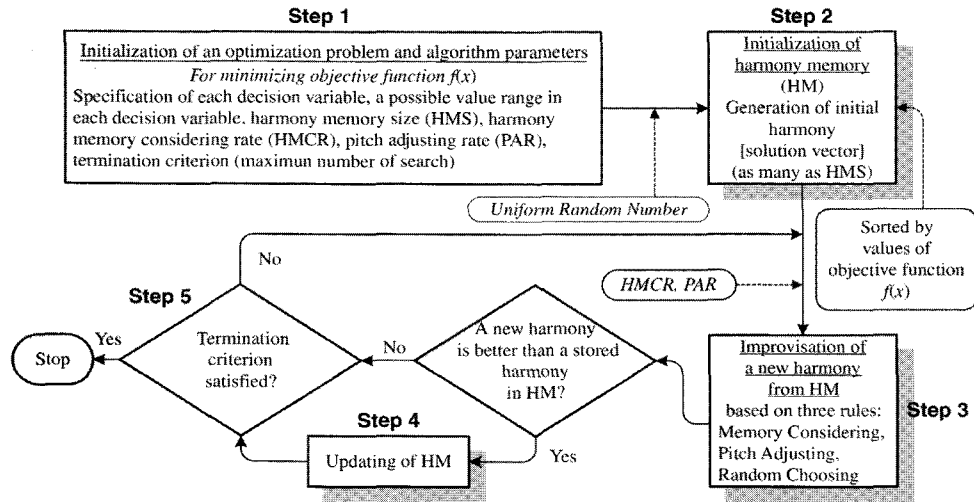


그림 3 화음탐색법에 의한 최적화 과정(Lee and Geem, 2005)

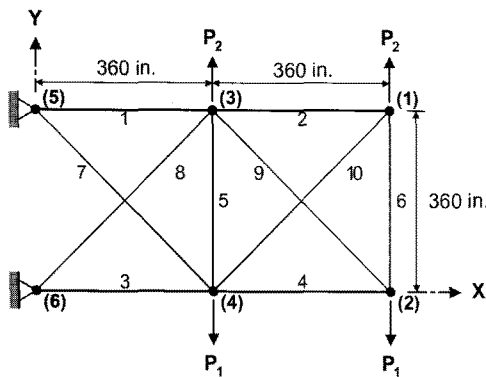


그림 4 10 부재 평면 트러스

새로운 화음을 구성한다. PAR은 좋은 화음을 만들기 위해 즉, 최적의 해를 탐색할 때 기존의 해와 이웃하는 값을 고려하기 위한 인자이며, 화음탐색법의 성능을 향상시키는 인자이다. 화음탐색법의 기본적인 흐름도는 그림 3과 같다.

Lee와 Geem(2004)은 최적화 성능 검증을 위해 이용되는 벤치마크 문제들 중에서 10 부재 평면 트러스(그림 4)의 최적 설계 문제에 대하여 화음탐색법과 타 최적화 기법(기존의 수학적 기법, 유전알고리즘 등)들을 적용한 결과를 비교하였다. 그 결과, 표 2와 같이 타 연구결과와 비교하였을 때, 화음탐색법이 최소의 중량을 갖는 트러스의 설계단면을 구할 수 있음을 보였다. 그 이외에도 다른 벤치마크 문제들에 대한 최적설계 결과를 타 기법의 결과와 비교하여 화음탐색법의 최적화 성능이 우수함을 검증하였다. 화음탐색법의 성능에

서 무작위로 새로운 화음을 생성하고, HMCR 값 보다 작으면 기존의 HM에 있는 화음을 구성하고 있는 변수들을 조합하여

표 2 10부재 평면트러스의 최적설계 결과 비교(Lee and Geem, 2004)

Variables	Optimal cross-sectional areas (in. <sup>3</sup> )														
	Schmit and Farshi	Schmit and Miura		Ven-kayya	Gellatly and Berke	Dobbs and Nelson	Rizzi	Khan and Willmert	Sunar and Belegundu	Stander et al.	Xu and Grandhi	Lamberti and Pappalettere		This work	
		NEW-SUMT	CON-MIN									LEAML	LESPL		
1	A <sub>1</sub>	33.43	30.67	30.57	30.42	31.35	3.50	30.73	30.98						30.15
2	A <sub>2</sub>	0.100	0.100	0.369	0.128	0.100	0.100	0.100	0.100						0.102
3	A <sub>3</sub>	24.26	23.76	23.97	23.41	20.03	23.29	23.93	24.17						22.71
4	A <sub>4</sub>	14.26	14.59	14.73	14.91	15.60	15.43	14.73	14.81						15.27
5	A <sub>5</sub>	0.100	0.100	0.100	0.101	0.140	0.100	0.100	0.100						0.102
6	A <sub>6</sub>	0.100	0.100	0.364	0.101	0.240	0.210	0.100	0.406	*	*	*	*	*	0.544
7	A <sub>7</sub>	8.388	8.578	8.547	8.696	8.350	7.649	8.542	7.547						7.541
8	A <sub>8</sub>	20.74	21.07	21.11	21.08	22.21	20.98	20.95	21.05						21.56
9	A <sub>9</sub>	16.69	20.96	2077	21.08	22.06	21.82	21.84	20.94						21.45
10	A <sub>10</sub>	0.100	0.100	0.320	0.186	0.100	0.100	0.100	0.100						0.100
Weight (lb)		5089.0	5076.85	5107.3	5084.9	5112.0	5080.0	5076.66	5066.98	5060.9	5060.85	5065.25	5060.96	5060.88	5057.88

Note: 1 in.<sup>2</sup> = 6.452 cm.<sup>2</sup>, 1 lb = 4.45 N. \*Unavailable.

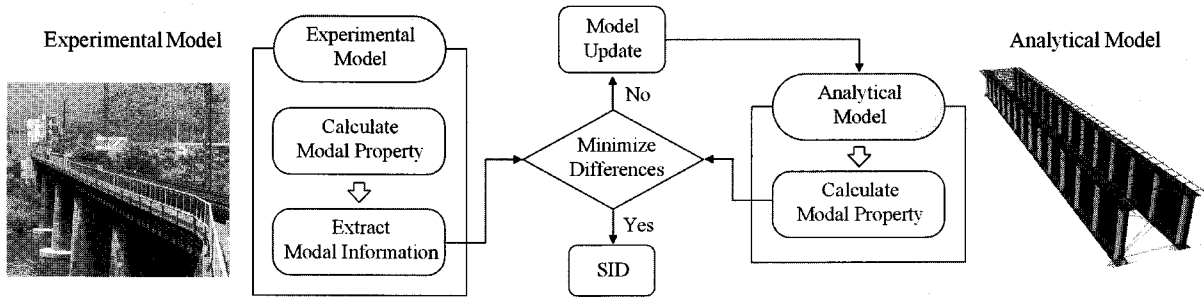


그림 5 해석모델개선을 통한 구조식별 과정

대한 보다 자세한 내용은 참고문헌(Lee와 Geem, 2004)에서 찾아볼 수 있다.

화음탐색법이 제안된 이후, 여러 공학 분야에서 그 적용성이 평가되었다. Geem 등(2005)은 차량 경로의 최적화 문제에 적용한바 있으며 그 결과를 유전 알고리즘과 진화(evolutionary) 알고리즘에 의한 결과와 비교하여, 두 기법에 비해 최적해를 얻는데 걸리는 시간과 계산 반복수의 면에서 우수함을 검증하였다. 이치훈 등(2006)은 화음탐색법에 의한 섬유보강 콘크리트의 최적 배합 설계를 수행함으로써 콘크리트의 최적 배합에 화음탐색법의 적용 가능성을 입증하였다. 또한 화음탐색법의 탐색성능 및 적용성을 높이기 위하여 많은 연구자들에 의한 노력이 진행 중에 있다.(Geem, 2006;Mahdavi et al., 2007; Cheng et al., 2008, Zou et al., 2009).

### 3. 화음탐색법을 이용한 구조식별

구조식별을 위해 계측되는 구조거동 특성은 하중재하에 따른 변위, 변형률과 같은 정역학적 특성과 가속도와 같은 구조진동을 이용하는 동역학적 특성을 이용한다. 최근에는 차량을 통제하고 많은 인력과 장비를 투입해야하는 정역학적 특성보다 구조물의 상시진동을 이용하는 동역학적 특성을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다(김정태, 2003; 조수진 등, 2007). 동역학적 구조특성 기반의 해석모델개선을 통한 구조식별 기법은 그림 5와 같이 실제 구조물로부터 추출된 모드특징과 해석모델로부터 계산된 모드특징의 차이가 최소화 되도록 지속적으로 해석모델을 개선하여 구조를 식별하게 된다.

그림 5와 같은 해석모델개선을 통한 구조식별 과정은 다음 식 (1)과 같은 최소화 문제로 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find } \mathbf{a} \\
 &\text{Minimize } F(\mathbf{a}) = |\mathbf{A} - \mathbf{B}(\mathbf{a})|, \\
 &\text{Subject to } \mathbf{a}_{min} \leq \mathbf{a} \leq \mathbf{a}_{max}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $\mathbf{a}$ 는 부재의 강성변화를 나타내는 설계변수,  $\mathbf{A}$ 는 실제 구조물로부터 취득된 모드특성치,  $\mathbf{B}(\mathbf{a})$ 는 해석모델로부터 계산된 모드특성치,  $F(\mathbf{a})$ 는 목적함수이다. 식 (1)을 기반으로 고유진동수, 모드형상, 모드형상의 1계 미분, 모드곡률 등을 이용한 많은 목적함수들이 제안된 바 있다(Hao and Xia, 2002; Maia et al., 2003).

이소영 등(2009)은 식 (2)와 같이 박재형 등(2006)이 제안한 고유진동수 및 모드변형에너지를 이용하는 목적함수를 구성하였다.

$$F_1(\alpha) = W_\omega f_{\omega_i}(\alpha) + W_\theta f_{\theta_j}(\alpha) \tag{2a}$$

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

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

여기서  $f_{\omega}$ 와  $f_{\theta}$ 는 각각 고유진동수와 모드변형에너지에 관한 목적함수이고,  $W_\omega$ 와  $W_\theta$ 는 고유진동수 및 모드변형에너지에 관한 목적함수의 가중치이다.  $\omega_{E_i}$ 와  $\omega_{A_i}$ 는 비손상 상태에서의 실험 모델과 해석모델에 대한 고유진동수를 나타내며,  $\theta_{E_{j,i}}$ 와  $\theta_{A_{j,i}}$ 는 비손상 상태에서 실험모델과 해석모델에 대한  $i$ 번째 모드,  $j$ 번째 위치의 모드변형에너지이다.  $NP$ 는 데이터 취득 위치의 개수이며,  $NM$ 은 구조식별시 고려하는 모드의 개수이고, 위첨자 “\*”는 손상된 구조물의 현재 상태를 의미한다.

이들은 위의 식 (2)를 바탕으로 보 구조물과 케이스 구조물에 대하여 화음탐색법을 이용하여 구조식별을 수행하였

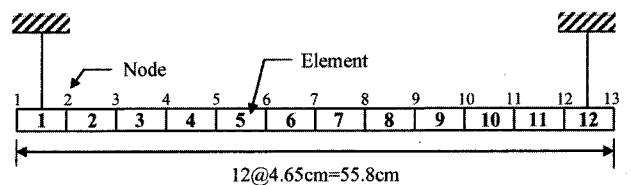


그림 6 양단자유보의 유한요소 모델(이소영 등, 2009)

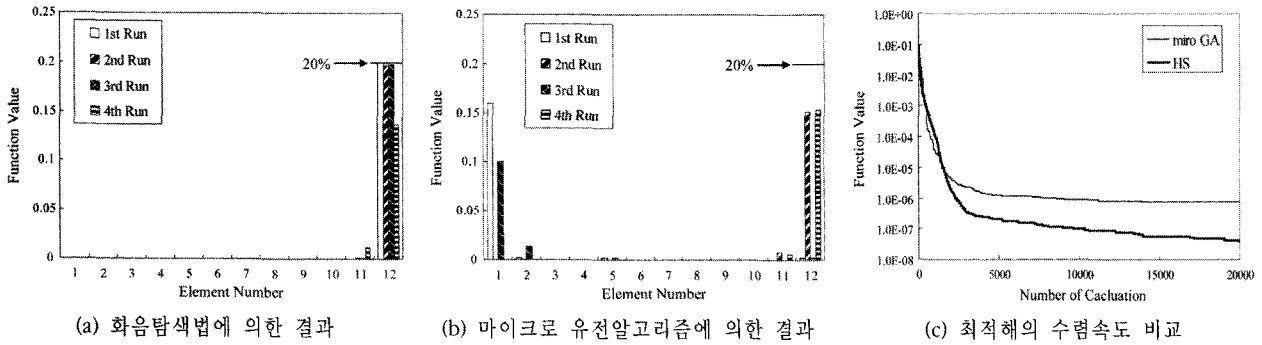


그림 7 화음탐색법 및 마이크로 유전알고리즘에 의한 보 구조물의 구조식별 결과(이소영 등, 2009)

고, 보 구조물의 경우, 화음탐색법 이용한 경우와 마이크로 유전알고리즘을 이용한 경우(박재형 등, 2006)에 대한 결과를 비교하였다. 이에 대한 결과를 아래에 간략하게 소개하고자 한다.

### 3.1 예제 1 : 보 구조물의 구조식별

이소영 등(2009)은 먼저, 화음탐색법의 구조식별 성능을 평가하기 위하여 그림 6과 같은 총 길이 55.8cm를 가지는 양단자유보에 대한 수치모델을 이용하였다. 구조식별을 위해 초기상태와 12번 요소의 강성을 20% 감소시킨 상태에 대한 고유진동수와 모드형상을 계산하였으며, 이를 이용하여 구조식별을 수행하였다.

화음탐색의 종료조건을 20,000번의 함수계산이 이루어졌을 때로 하여 구조식별을 수행한 결과, 그림 7(a)와 같이 12번 요소의 강성 감소에 대하여 위치 및 강성감소의 정도까지 비교적 정확하게 식별하였다. 화음탐색법에 의한 구조식별 기법의 성능을 검증하기 위하여, 화음탐색법과 동일한 함수계산 횟수를 종료조건으로 하여 마이크로 유전알고리즘을 이용한 구조식별을 수행하였으며, 그 결과를 비교하였다. 마이크로 유전알고리즘에 의한 구조식별 결과는 그림 7(b)와 같다. 화음탐색법에 의한 구조식별 결과와 비교해 볼 때, 강성 변화의 위치를 식별하였지만 강성의 변화가 없는 위치에서도 강성의 감소가 발생한 것으로 잘못 식별하였으며, 강성감소의 정도도 정확하게 식별하지 못하였다. 그림 7(c)는 최적해의 수렴속도를 비교한 것이다. 초기의 수렴속도 면에서는 마이크로 유전알고리즘에 의한 결과가 다소 빠르게 수렴하지만, 최적해까지의 탐색성능은 화음탐색법에 의한 결과가 뛰어난 것을 알 수 있다.

### 3.2 예제 2 : 케이스 구조물의 구조식별

이소영 등(2009)은 항만의 안벽으로 주로 사용되는 케이

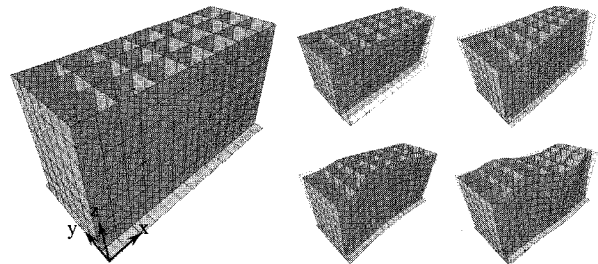


그림 8 케이스 구조물의 유한요소 모델(이소영 등, 2009)

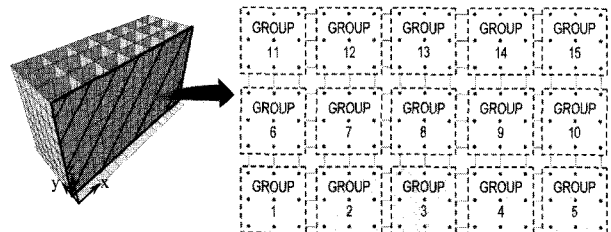
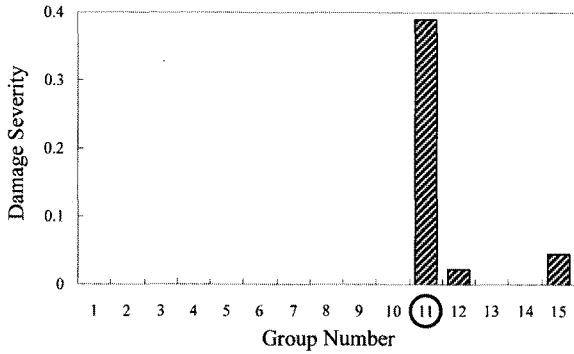


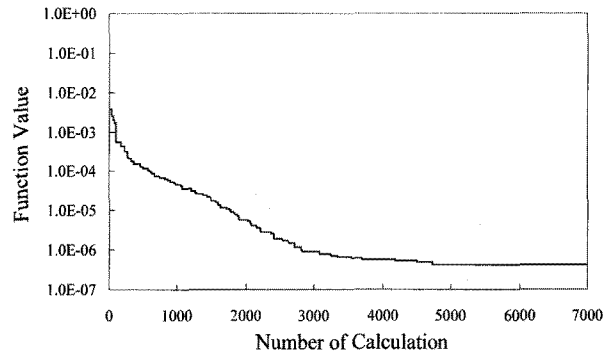
그림 9 케이스 구조물 유한요소모델의 스프링요소 그룹화 (이소영 등, 2009)

스 구조물의 배후면 경계조건에 대한 구조식별을 위해 화음탐색법을 적용하였다. 케이스 구조물에 대한 유한요소 모델은 그림 8과 같으며 구조물의 내부에 격벽이 존재한다. 케이스 구조물 유한요소 모델의 경계조건으로 측벽에 대하여 모든 방향의 자유도를 구속하고, 후면벽 및 바닥면에 대하여 각각 y, z 방향의 강성을 갖는 스프링 요소를 적용하였고 다른 방향의 자유도는 구속하였다. 구조식별 대상으로 하는 경계조건의 스프링 요소가 135개로, 이를 모두 식별하기 위해서는 많은 시간이 소요되기 때문에 그림 9와 같이 후 벽면의 스프링요소를 15개로 그룹화하였다.

보 구조물의 경우와 유사하게 초기 상태와 11번 그룹에 포함된 스프링요소의 강성이 45% 감소하였을 때에 대하여 구조식별을 수행하였다. 이때, 케이스 구조물의 경우 모드형상의 측정이 불가능한 경우가 많기 때문에, 고유진동수만을 이



(a) 화음탐색법에 의한 구조식별 결과



(b) 최적해의 수렴속도

그림 10 화음탐색법에 의한 케이스 구조물의 구조식별(이소영 등, 2009)

용한 목적함수를 고려하였다.

화음탐색법을 이용한 케이스 구조물의 구조식별 결과는 그림 10과 같다. 그 케이스 구조물은 보 구조물보다 복잡한 구조를 가짐에 따라 보 구조물의 결과에 비해 정확한 강성 변화의 위치나 정도를 식별하지 못하였지만, 고유진동수만을 고려한 목적함수를 사용한 점과 종료조건을 함수계산횟수 7,000번으로 하였음을 고려하였을 때, 만족할 만한 구조식별 결과를 얻을 수 있음을 보였다.

#### 4. 맺음말

본 기사에서는 메타 휴리스틱 최적화 기법인 화음탐색법과 그 성능을 소개하고, 구조식별 분야에 대한 적용사례를 소개하였다. 최적화 기법의 우수성은 최적해의 수렴속도, 정확도, 범용성 등에 의해 평가된다. 음악적 개념에서 영감을 얻어 개발된 화음탐색법은 기존의 최적화 기법이 가진 장점을 두루 갖추고 있어 뛰어난 최적화 성능을 나타낸다. 이는 여러 연구자들에 의해 최적해의 수렴속도 및 정확도 면에서의 우수성이 검증되었다. 비록, 유전 알고리즘이 처음 제안된 이후 수십 년간 많은 연구자들에 개선되어 최적화 성능이 탁월하고 범용적으로 적용이 가능한 기법으로 주목받고 있었지만, 화음탐색법이 처음 개발된 유전알고리즘 보다 뛰어난 성능을 가지고 있기 때문에, 앞으로 성능 개선을 위한 노력이 이루어진다면, 보다 빠르고, 정확한 최적화가 가능하게 될 것이라 기대된다. 또한, 함수계산 시 오랜 시간이 요구되는 구조식별 과정에 있어서도 많은 시간을 절약할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

1. 김여근, 윤복식, 이상복 (2000) 메타 휴리스틱: 유전알고리

듬, 시뮬레이티드 어닐링, 타부서치, 영지문화사.

2. 김정태 (2003) System Identification의 활용사례: 교량의 구조식별과 손상추정의 관점, 전산구조공학, 15(1), pp. 15~23.

3. 김정희 (2007) Harmony Search Heuristic Algorithm에 벌칙함수를 도입한 구조물의 이산최적화, 한양대학교 대학원, 석사학위논문.

4. 박재형, 김정태, 류연선, 이진학 (2006) 고유진동수와 모드 변형에너지를 이용한 향상된 유전알고리즘 기반 손상검색 기법, 한국전산구조공학회 논문집, 73, pp.313~322.

5. 윤정방, 이진학, 이종재, 이정석, 전귀현 (2004) 유전자 알고리즘을 이용한 모드기반 교량의 해석모델개선, 한국전산구조공학회 논문집, 17(4), pp.389~403.

6. 이소영, 김정태, 이진학, 강윤구 (2009) 최적화 화음탐색법을 이용한 항만 케이스 구조물의 구조건전성 평가, 한국해양공학회지, pp.122~128.


7. 이상열 (2005) 마이크로 유전 알고리즘을 이용한 자유진동 박판구조물의 비파괴 손상 규명, 한국강구조학회 논문집, 17(2), pp.173~181.

8. 이치훈, 이주하, 윤영수 (2006) 화음탐색법을 이용한 강섬유 및 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 최적배합 설계, 한국콘크리트학회논문집, 18(2), pp.151~159.

9. 조수진, 이진학, 이창근, 윤정방 (2007) 상시진동계측에 의한 교량의 공용내하력 평가, 대한토목학회논문집, 27(1), pp.79~89.

10. Cheng, Y.M., Li, L., Lansivaara, T., Chi, S.C., and Sun, Y.J. (2008) An Improved Harmony Search Minimization Algorithm using Different Slip Surface Generation Methods for Slope Stability Analysis, *Engineering Optimization*, 40(2), pp.95~115.

11. Geem, J.W. (2006) Improved Harmony Search from Ensemble

- of Music Players, *Lecture Notes in Computer Science*, 4251, pp.86~93.
12. Geem, J.W. and Kim, J.H. (2001) A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, *Simulation*, 76(2), pp.60~68.
  13. Geem, J.W. and Lee, K.S. and Park, Y. (2005) Application of Harmony Search to Vehicle Routing, *American Journal of Applied Sciences*, 2(12), pp.1552~1557.
  14. Glover, F. (1977) Heuristic for Integer Programming using Surrogate Constraints, *Decision Sciences*, 8(1), pp. 156~166.
  15. Goldberg, D. E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, *Addison Wesley*, Boston, MA.
  16. Hao, H. and Xia, Y. (2002) Vibration-based Damage Detection of Structures by Genetic Algorithm, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(3), pp.222~229.
  17. Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. and Vecchi, M.P. (1983) Optimization by Simulated Annealing, *Science, New series*, 220(4598), pp.671~680.
  18. Lee, K.S. and Geem, Z.W. (2004) A New Structural Optimization Method Based on Harmony Search Algorithm, *Computers and Structures*, 82, pp.781~798.
  19. 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.* 194, pp.3092~3933.
  20. Lee, J.J., Lee, J.W., Yi, J.H., Yun, C.B., and Jung, H.Y. (2005) Neural Networks-based Damage Detection for Bridges Considering Errors in Baseline Finite Element Models, *Journal of Sound and Vibration*, 280, pp.555~578.
  21. Mahdavi, M., Fesanghary, M., and Damangir, E. (2007) An Improved Harmony Search Algorithm for Solving Optimization Problems, *Applied Mathematics and Computation*, 188, pp. 1567~1579.
  22. Maia, N.M.M., Silva, J.M.M. and Almas, E.A.M. (2003) Damage Detection in Structures: from Mode Shape to Frequency Response Function Methods, *Mechanical System and Signal Processing*, 17(3), pp.489~498.
  23. Mares, C. and Surace, C. (1996) An Application of Genetic Algorithms to Identify Damage in Elastic Structures, *Journal of Sound and Vibration*, 195(2), pp.195~215.
  24. Van Laarhoven, P.J.M. and Arts, E.H.L. (1987) Simulated Annealing : Theory and applications, *Kluwer Academic Publishers*.
  25. Wu, X., Ghaboussi, J. and Garrett, J.H.Jr (1992) Use of Neural Networks in Detection of Structural Damage, *Computers and Structures*, 42(5), pp.649~659.
  26. Zou, D., Gao, L., Wu, J., Li, S., and Li, Y. (2009) A Novel Global Harmony Search Algorithm for Reliability Problems, *Computers & Industrial Engineering*, *In press*.
  27. Zimmerman, A.T. and Lynch J.P. (2009) A Parallel Simulated Annealing Architecture for Motel Updating in Wireless Sensor Networks, *IEEE Sensors Journal*, 9(11), pp.1503~1510. 

[담당 : 이진학, 편집위원]