

화음탐색 알고리즘을 이용한 네트워크 돔의 정삼각형 격자 조절기법

An Arrangement Technique for Fine Regular Triangle Grid of Network Dome by Using Harmony Search Algorithm

손수덕* 조혜원** 이승재***
Shon, Su-Deok Jo, Hye-Won Lee, Seung-Jae

Abstract

This paper aimed at modeling a fine triangular grid for network dome by using Harmony Search (HS) algorithm. For this purpose, an optimization process to find a fine regular triangular mesh on the curved surface was proposed and the analysis program was developed. An objective function was consist of areas and edge's length of each triangular and its standard deviations, and design variables were subject to the upper and lower boundary which was calculated on the nodal connectivity. Triangular network dome model, which was initially consist of randomly irregular triangular mesh, was selected for the target example and the numerical result was analyzed in accordance with the HS parameters. From the analysis results of adopted model, the fitness function has been converged and the optimized triangular grid could be obtained from the initially distorted network dome example.

Keywords: Network dome, Regular triangular grid, Harmony search algorithm, Meta-heuristic method, Standard deviation

1. 서론

비정형 구조물의 외피 디자인에서 삼각형 격자 그리드는 매우 빈번하게 적용되는 격자 패턴 중 하나이다. 곡면을 표현하는 최소 다각형인 삼각형은 그래픽 분야는 물론 구조물 해석에도 많이 이용되는 형태이며, 적용하기 용이할 뿐만 아니라 매우 아름다운 격자구조를 형성하는 요건을 충족한다. 3방향 네트워크 돔은 삼각형기반의 정형화된 구조이며, <Fig. 1>과 같이 경기장 지붕구조물에 많이 적용되어 왔고, 많은 비정형 외피 구조물들도 삼각형 구조

를 이용하고 있다.¹⁾

단층 네트워크 돔은 비교적 적은 자중으로 공간을 형성할 수 있으나 불안정에 대한 문제를 해결해야 하며, 네트워크 부재의 균일한 힘의 저항능력은 매우 중요한 설계요인이 되기도 한다. 단층 돔의 불안정 문제는 기하학적 형상과 더불어 부재 내부의 내력과 불안정이라는 문제에 매우 많은 관심을 두고 연구^{2~6)}가 진행되어 왔고, 각각의 격자 부재를 동일한 간격으로 분할하여 격자패턴을 결정하는 삼각형 네트워크 돔의 설계는 높이와 직경에 따라서 결정되는 형상특성으로 인해 정삼각형으로는 구성할 수 없으므로 비교적 최소의 편차의 격자로 모델링하게 되었다. 자유 형상 구조물에서도 균일한 네트워크 모델링은 역학적 특성뿐 아니라 경제적으로도 중요한 요인이 된다. 즉, 좋은 격자구조는 구조적으로 안정하면서 최소의 재료로 제작되도록 설계하여야 한다.^{5~7)}

* 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학부 연구교수, 공학박사
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education

** 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학부 대학원, 석사과정
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education

*** 교신저자, 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education
Tel: 041-560-1334 Fax: 041-560-1224
E-mail: leeseung@koreatech.ac.kr



〈Fig. 1〉 Dome and Roof cladding using Triangular grid

격자부재를 최소 부재그룹으로 모델링하고 설계하는 것은 태양광 발전시스템을 삼각형 격자지붕에 적용할 경우에도 유용하다. 집열판의 최소 그룹으로 모델링하는 것은 격자설계에서 고려되어야 하는 것은 자명한 사실이다. 즉, 공간상의 곡면에서 네트워크 패턴을 어떻게 설계해야만 좋을 것인가는 실무설계의 입장에서 매우 중요한 한 부분이며, 목적에 따른 최소의 편차로 설계된 삼각형 격자부재는 곡면을 효율적으로 설계하고 배치할 수 있게 해 준다. 이것은 임의의 곡률을 가진 곡면의 정삼각형기반 네트워크 모델링을 위해서는 각각의 분할된 삼각형의 면적과 격자 길이의 편차가 최소가 되어야 한다. 과거에도 격자구조물의 효율적인 설계를 위해 여러 가지 형태로 모델링 기법이 시도되었으며, 근래에도 정삼각형 패턴 형성을 위해서 차분진화기반의 패턴설계가 연구되었다.⁷⁾ 이 같은 최소길이편차를 가지는 격자설계는 전역최적화 기법을 적용하는 것이 매우 용이하다.⁸⁾

자연현상에 기초한 전역최적화 알고리즘의 개발은 1970년대 이후 컴퓨터의 발달로 실무 응용이 가능하게 되었다.⁸⁾⁻¹¹⁾ 함수의 기울기를 이용한 탐색기법에서 나타나는 국소해(Local minima)의 문제점은 확률적 병렬 탐색기법을 적용하여 전역 최적해(Global optimization)를 얻을 수 있게 되었고, 유전자알고리즘(Genetic Algorithm: GA)⁹⁾이 그 대표적인 예라 할 수 있다. 다른 방법에 비해 문제 해결을 위한 복잡한 수학적식 없이 전역탐색을 수행하는데 매우 효과적이었다. 그러나 비효율적 수렴시간과 같

은 단점들을 극복하기 위해서 다양한 메타 휴리스틱 알고리즘이 등장하였고, 차분진화(Differential Evolution: DE)기법, 진화프로그래밍(Evolutionary Programming: EP)기법 등과 같은 자연의 유전적 특성을 모방한 알고리즘이 대표적이다.^{10),11)} 유전적 특성을 모방하려는 많은 시도와 더불어 자연이나 혹은 다른 여러 최적화 수리모형에 맞는 탐색기법이 개발되고 발전되어왔고, 대표적인 예로 개체의 군집이론을 기반으로 한 군집최적화(Particle Swarm Optimization: PSO)나 악기 조율방법에서 모델링한 화음탐색(Harmony Search: HS) 알고리즘^{11),12)} 등이 있다. 최근 많은 공학문제에 응용되고 있는 HS 알고리즘은 화음메모리 구조를 이용하여 확률변수를 이용한 조합된 설계 변수 집합을 이용하며, 다른 알고리즘에 비해 수학적인 정보가 거의 필요 없어 매우 간단하게 적용 가능한 특징을 가지고 있다.^{12),13)} 이와 같은 특징으로 인해서 다양한 분야에 적용되고 있으며, 본 연구에서는 이와 같은 특성의 HS 알고리즘을 네트워크 돔의 정삼각형 격자 모델링에 적용하고 제안된 프로세스의 수행 가능성과 적용성에 대해서 연구하도록 한다.

2. 화음탐색(Harmony Search: HS)기반 격자조절 모델링

2.1 HS 알고리즘

메타휴리스틱 알고리즘들은 주로 자연의 특성을 기반으로 수리모형이 개발되었으며, 물리적, 사회학적, 생물학적 또는 복합된 수리모형을 모방하고 있다. 일점 또는 다점탐색 등의 다채로운 연산기법들은 GA, DE, EP, PSO, HS 등으로 발전하였다. 다른 알고리즘과는 달리 악기 조율과정을 모델링한 HS는 J.W. Geem¹²⁾⁻¹⁴⁾에 의해 처음 제안된 기법으로 기존 방법에 비해 최적해 탐색에 있어 우수한 결과를 나타내고 있다.¹¹⁾⁻¹⁹⁾ HS의 장점은 더 적은 수학적 정보에도 문제에 잘 적용되고 결정변수의 초기치를 필요로 하지 않으며, 무작위 검색을 사용하기 때문에 유도체 정보 또한 불필요하다는 것이다. 즉흥연주와 화음조절에서 영감을 얻은 HS는 아름다운 소

리가 반복연습과 세미한 조율을 통해 이루어지듯이 객관적 목표치 역시 반복과 음원의 미세한 조절이 값을 향상시킨다는 것에서 출발한다.

여러 악기의 소리들이 불협화음에서 점차 협화음으로 찾아가는 HS과정은 모두 5단계로 설명된다. 매개변수 초기화, 화음메모리(Harmony Memory: HM)초기화, 음원추출/피치조절(Pitch adjustment), HM갱신, 탐색종료단계로 진행된다. 여기서 HM은 저장되는 메모리의 크기에 따라 수렴속도와 정밀도가 달라지며, 화음메모리크기(Harmony Memory Size: HMS)만큼 저장된다. 피치조절을 위한 음원 추출도 HMCR(HM considering rate)에 의해 결정되며, 미세한 조절은 PAR(Pitch Adjusting Rate) 변수에 따라 조절된다. HM은 이제까지 경험했던 화음 중에서 제일 좋은 화음들의 집합이고, GA의 유전자 풀과 유사하다. 우선 설계변수의 초기화는 다 음식과 같이 정의할 수 있다.

$$x_{i,j} = x_j^{\min} + r_j \times (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (1)$$

초기화 된 HM는 HMS만큼 임의로 생성되며, 적합도 평가 후 저장되며, 다음과 같다.

$$HM = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 & : & f(\mathbf{x}_1) \\ \mathbf{x}_2 & : & f(\mathbf{x}_2) \\ \vdots & : & \vdots \\ \mathbf{x}_{HMS} & : & f(\mathbf{x}_{HMS}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{x}_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N}\}$ 이다. HMCR은 HM 내에서 하나의 벡터를 선택하기 위한 비율이고 (1-HMCR)은 값의 가능범주로부터 무작위로 선택하기 위한 비율이 된다. 이러한 랜덤 변수를 이용하여 전역탐색의 여부를 결정하게 된다.

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} x'_i \in HM_{j,i} & \text{with HMCR} \\ x'_i \in X_i & \text{with (1-HMCR)} \end{cases} \quad (3)$$

피치조절은 PAR에 따라서 결정되고 조율의 폭과 연산은 다음과 같이 계산할 수 있다. 여기서 미세한 피치조절은 세대수에 따라 변할 수 있다.

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} Yes & \text{with PAR} \\ No & \text{with (1-PAR)} \end{cases} \quad (4a)$$

$$x'_i \leftarrow x'_i \pm r_i * bw \quad (4b)$$

여기서 bw는 임의의 거리 밴드 폭(Band Width)이다. 새로운 화음벡터인 $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$ 는 HM 음원 추출, 피치조절, 임의선택의 세 가지 규칙에 따라 생성되며, 이것을 즉흥(Improvisation)이라 한다. 최종적으로 새로운 화음벡터가 HM을 개선할 수 있다면 HM에 가장 좋지 않은 화음대신 저장하고, 과정을 반복한다. 탐색종료 기준에 따라서 계산이 종료되고 그렇지 않으면 다시 반복하게 된다. 이 과정을 가상코드로 나타내면 <Fig. 2>와 같다.

```

Initialization : HM, HMS, HMCR, x
while (not_termination)
  for j = 1:dim do
    if (r<HMCR)
      x[i,j] from HM
      if (r<PAR)
        x[i, j]=x[i, j]±r*bw
      else
        x[i, j]=x (∈ X)
      end if
    else (random selection)
      x[i, j]=x (∈ X)
    end if
  end do
  Consideration of constraints
  Evaluate fitness of x
  Update HM memory and fitness
end while
    
```

<Fig. 2> Virtual Code of HS algorithm

2.2 개선된 HS(Improved HS: IHS)

HMCR과 PAR은 각각 전역 및 국소 탐색에 영향을 주며, bw는 최적화 된 솔루션 벡터의 미세한 조정과 수렴 속도에 매우 유용하게 사용된다. 그러나 고정된 확률변수를 사용하는 경우 반복횟수가 늘어나 성능이 저하된다. 이러한 점을 극복하기 위해 동적변수를 적용한 것이 IHS¹⁴⁾이며 즉흥단계에서 다양한 PAR과 bw값이 이용된다. 이것은 다음과 같이 세대수에 따라 변하는 함수로 표현할 수 있다.

$$PAR(n_g) = PAR_{\min} + (PAR_{\max} - PAR_{\min}) \frac{n_g}{n_i} \quad (5)$$

$$bw(n_g) = bw_{max} \exp\left(\ln\left(\frac{bw_{min}}{bw_{max}}\right) \frac{n_g}{n_i}\right) \quad (6)$$

여기서, $PAR_{min(or\ max)}$: 최소(최대) 피치조정속도, $bw_{min(or\ max)}$: 최소(최대) 밴드 폭, n_i : 벡터 수, n_g : 세대수이다. 이와 같이 기존의 HS에서 확률파라메타의 동적 변화를 주는 영향은 전역해 탐색속도와 지역 및 전역탐색의 조화로운 균형을 예상할 수 있다. 그러나 각각의 파라메타가 주는 영향과 최적의 파라메타가 무엇인지는 문제의 형성과 모델링에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 목적함수가 주는 특성에 따라 결정되어진다.

2.3 격자조절 모델링

삼각형 격자구조물의 균등한 배치를 위해서는 정삼각형에 가까운 격자모델링이 유리하고, 정삼각형은 내부의 각과 세변의 길이가 같다. 따라서 삼각격자로 균등하게 구성하는 것은 우선 격자길이 표준편차가 최소가 되도록 설계하는 것을 의미한다. 즉, 정삼각형으로 연결된 곡면은 삼각형 면적(a)이 일정하므로 이들의 표준편차($STD(a)$)가 최소가 되며, 세변의 길이(l_i)에 대한 표준편차($STD(l_i)$)도 최소가 되어야만 한다. 이러한 특성을 이용하여 최적화 수리모형을 제안하기로 하며, 표준편차로 표현된 함수는 식(7)과 같다.⁷⁾

$$f(a, l) = STD(a) + \sum_{i=1}^{nrod} STD(l_i) \quad (7)$$

여기서 $a = \{a_1, \dots, a_{ntri}\}^T$, $l_i = \{l_i^1, l_i^2, l_i^3\}^T$, $i = 1, \dots, nrod$, $ntri$: 삼각형요소 수, $nrod$: 격자부재 수, $STD()$: 표준편차.

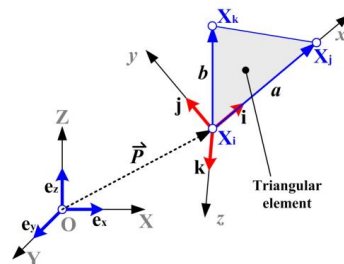
삼각형의 면적 a 과 길이 l_i 는 절점데이터로 계산할 수 있으며, 절점 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_{nrod}\}^T$ 은 식(7)의 내제된 변수가 된다. 우선, 격자구조물의 임의의 단계에서의 형상절점을 X 로 정의하고, 설계곡면에 존재한다고 가정하자. 초기형상에서 절점이 곡면을 따라 이동된 변화량을 δX 라 하면 절점의 변화

에 따른 표준편차 변화를 목적함수로 정의할 수 있으며, 식(8)과 같다. 또한 초기형상에서 δX 만큼 변화하였을 때에도 격자의 위상이 변하지 않도록 상하한($\delta X_{min(or\ max)}$) 경계조건을 제약함수로 정의할 수 있으며, 식(9)와 같다.

$$\text{Objective } f(\delta X) = STD(a(X + \delta X)) + \sum_{j=1}^{nrod} STD(l_j(X + \delta X)) \quad (8)$$

$$\text{Subject to } \delta X_{min} \leq \delta X \leq \delta X_{max} \quad (9)$$

위 식은 3차원 공간에서의 삼각형 격자분할문제를 2차원 문제로 형성할 수 있게 해 준다. 곡면방정식을 통해서 공간상의 위치정보를 이용하면 설계변수는 곡면좌표로 표현되어지기 때문이다. 따라서 곡면위의 좌표로 표현되는 절점정보는 원래의 3차원 형상을 왜곡시키지 않는 범위에서 최소의 편차를 가지는 삼각형격자곡면을 얻게 된다.



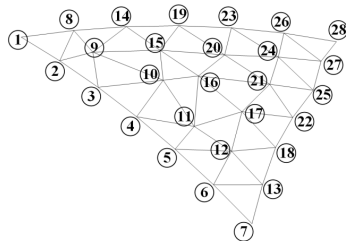
<Fig. 3> Coordinate transformation

삼각형 요소를 이용한 절점좌표의 변환은 <Fig. 3>과 같은 변환모형으로 계산할 수 있으며, 전체요소좌표계와 국소좌표계의 절점의 좌표를 X_i, X_j, X_k 및 x_i, x_j, x_k 라 할 때, 국소좌표계에서의 단위기저를 이용하여 계산할 수 있다. 그림은 두 좌표계 간의 변환을 의미하므로, 곡면정보와 더불어 이를 이용하면 격자조절모델의 좌표로 변환할 수 있다. 또한 삼각형 면적과 세변의 길이표준편차는 국소좌표계로 변환된 좌표 x_i, x_j, x_k 를 이용하면 쉽게 계산할 수 있다. 각 단계에서 초기좌표와 절점의 변화량으로 구성되는 식(8)의 최적화 수리모델의 해를 구하기 위해서 식(9)의 조건과 좌표변환 및 IHS 알고리즘을 이용하여 최적 해를 구하도록 한다.

3. 삼각형 네트워크 돔 예제

3.1 해석대상 모델

정삼각형 네트워크 돔 예제로 <Fig. 4>와 같은 형상의 모델을 채택하기로 한다.⁷⁾ 격자조절 모델링은 앞장에서 설명한 바와 같다. 예제는 모두 28개의 절점과 63개의 격자부재로 구성되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 내부 절점은 왜곡되어 있으며, 평면에 투영된 절점좌표는 <Table 1>과 같고, 경계부분의 투영길이는 6m이다.



<Fig. 4> Triangular network dome example

<Table 1> Nodal coordinates of a triangular network dome example (Unit: m, m²)

Node	X-coor	Y-coor	Node	X-coor	Y-coor
1	0.0	0.0	15	1.762	1.975
2	1.0	0.0	16	2.589	1.792
3	2.0	0.0	17	4.082	2.052
4	3.0	0.0	18	5.0	1.732
5	4.0	0.0	19	1.5	2.598
6	5.0	0.0	20	2.591	2.857
7	6.0	0.0	21	3.773	3.093
8	0.5	0.866	22	4.5	2.598
9	1.0	0.507	23	2.0	3.464
10	2.601	1.351	24	3.226	3.930
11	4.0	0.555	25	4.0	3.464
12	4.515	0.764	26	2.5	4.330
13	5.5	0.866	27	3.5	4.379
14	1.0	1.732	28	3.0	5.196

해석예제의 절점은 구면상에 위치하므로 수리모델의 z좌표 값은 돔형 곡면함수로 정의된다. 돔 곡면좌표를 정의하기 위해서 저면반경 L과 높이 H로 구성되는 시스템을 고려하자. 형상을 $\mu = H/2L$ 로 정의하고, 구의 중심이 (0,0,0)에서 높이 H와의 관계를 이용하여 식(10)과 같이 z(x,y) 좌표를 결정할 수 있다.

$$z(x,y) = z_0(x,y) - r - H \quad (10)$$

여기서, $z_0(x,y) = r \cos \theta$, $r = L / (2 \arctan(2\mu))$ 이다. 삼각형 네트워크 돔은 일반적으로 여섯 개로 분할된 대칭모델이므로 <Fig. 4>와 같이 한쪽 분할 면만을 대상으로 해석을 수행하도록 한다.

형상파라메타 분석을 위해서 $\mu=0.1$ 모델을 대상 예제로 채택하였다. 채택된 모델은 <Table 2>와 같이 삼각형 면적합계 15.5925m², 평균면적 0.4423m², 면적편차 0.91342m², 세변의 길이편차합계 4.492m, 편차평균 0.1248m로 매우 불규칙하며, 내부의 삼각형들은 모두 왜곡된 형상을 이루고 있다. 격자부재도 길이 총합 64.594m, 평균길이 1.0253m, 표준편차 0.15039m이다.

<Table 2> Initial information of a triangular network dome example (Unit: m, m²)

Triangular mesh	Sum of area	1.5925E+01
	Ave. area	4.4236E-01
	SD of Area	9.1342E-02
	Sum of SDe	4.4926E+00
	Ave of SDe	1.2480E-01
	Edge SD	7.8104E-02
Grid member	Sum of length	6.4594E+01
	Ave. length	1.0253E+00
	Length SD	1.5039E-01

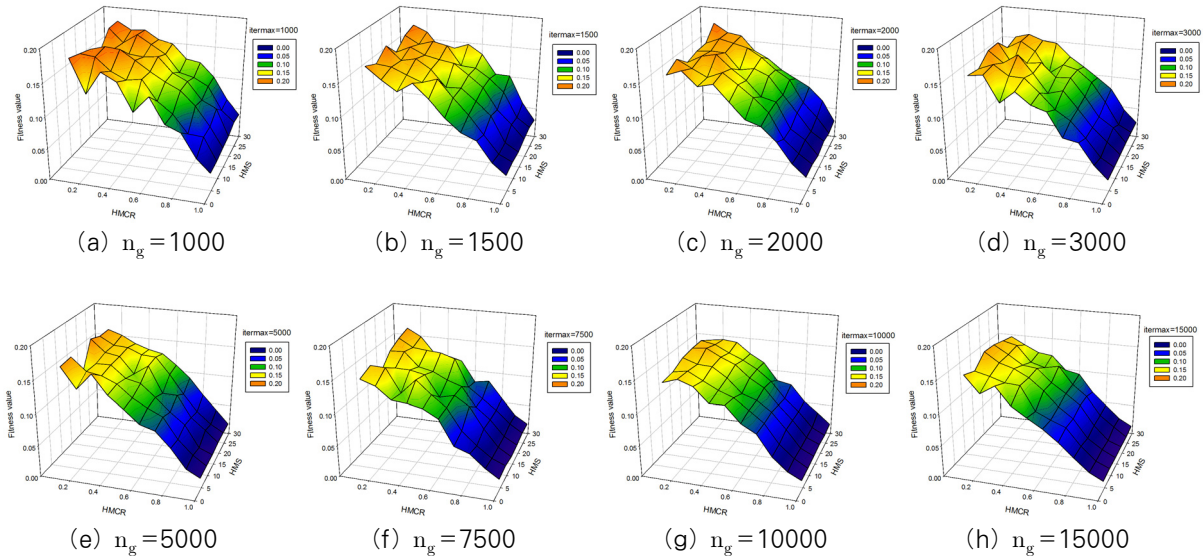
SD: Standard deviation

SDe: Standard deviation of Triangular Edge.

3.2 파라메타 스터디를 통한 최적변수

전역 최적해의 탐색은 기존의 메타 휴리스틱 기법에서도 마찬가지이지만 확률변수의 결정이 매우 중요하다. HS의 경우 HM의 크기 HMS와 HMCR 및 PAR의 결정이 매우 중요하다. 또한 최대반복계산횟수(n_g)값이 얼마이냐에 따라 bw의 값이 변화하므로 매우 중요한 파라메타가 된다.

파라메타 변화에 따른 최적해의 분포를 살펴보기 위해서 최대반복횟수 n_g를 각각 1000, 1500, 2000, 3000, 5000, 7500, 10000, 15000으로 채택하고, 확률파라메타를 조절하도록 한다. 메모리 크기 HMS의 값은 5-50의 범위에서 관찰해 보기로 한다. HMCR의 경우도 식(5)와 같이 0.0-0.99까지 변화된 값을 이용하도록 하며, PAR의 경우도 식(6)에서 제시된 방법을 이용하여 적용하도록 한다.



<Fig. 5> Optimum results of a triangular network dome example

해석결과 <Fig 5>의 그래프와 같다. 각각의 해석 결과에서 살펴 볼 수 있듯이 HMCR의 영향이 가장 크며, 1에 가까울수록 값은 좋아진다. 그러나 1.0의 경우 국소해의 존재에 대한 탐색방법의 조화가 깨어질 수 있으며, 가장 빈번하게 사용되어진 경우는 0.9와 0.99의 경우가 가장 많이 소개되고 있다.

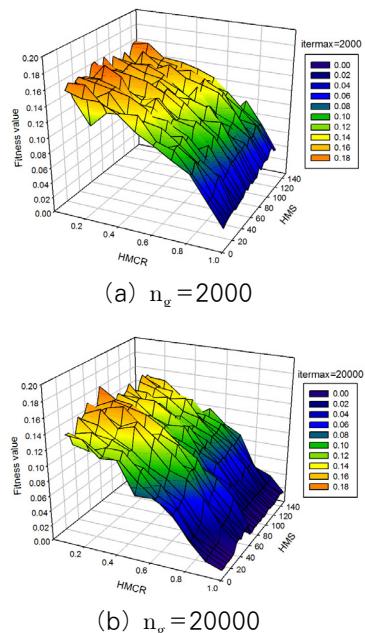
HMS의 경우 모든 HMCR의 범위와 n_g 의 경우에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 특히 더 큰 값으로 갈 경우 해의 정밀도는 오히려 낮게 나타나며, 이것은 GA와는 다른 특징을 보이고 있다.

해석결과에서 적합도 반복계산횟수 n_g 는 속도에 영향을 준다. 채택된 모델에서 HMS는 계산횟수에 큰 영향을 주지 않는다. 단지 동일한 n_g 의 경우 HMS 정도의 차이가 있을 뿐이다. 따라서 HMS에 비해 현저히 큰 n_g 의 경우는 전혀 영향이 없다. 일반적으로 HMS는 5-10의 변수를 사용하는 경우가 많지만 30개의 메모리크기를 제시한 경우도 있다. 피치조절변수인 bw도 0.0001에서 0.05까지 변화한다. 이러한 변화는 지역탐색에 영향을 줄 수 있고, 값의 정밀도가 높아질 수 있다.

지금까지의 결과에서 HMS의 결과는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이를 더 정확하게 알아보기 위해서 앞서 설명된 모델에서 n_g 의 차이를 가장 크게 한 모델로 2000, 20000을 채택하여 비교한

다. 이때, HMS의 수를 140까지 증가시켜 해석을 수행하도록 한다. 해석결과로 나타난 <Fig. 6>은 이 결론을 잘 설명하고 있다. 여기서 n_g 가 2000인 경우는 HMS의 증가가 오히려 높은 적합도 값의 결과를 보이고 있는 반면, 20000인 경우는 큰 변동이 없다. 또한 전체적인 변화에서도 영향을 미치지 않는다.

결과에서 볼 때, 일정한 크기 이상의 HM은 수렴 성과 정밀도에 큰 영향을 주지 않는다. 그리고

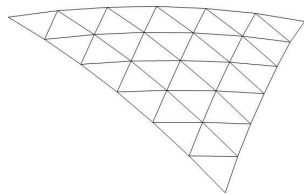


<Fig. 6> Optimum results of a triangular network dome example (HMS=140)

HMCR이 1.0에 가까울수록 해가 좋아지지만 1.0일 경우는 국소 최적에서 벗어나기 위한 연산을 수행하지 않는 것을 의미한다.

3.3 고찰

<Fig. 4>모델의 해석결과형상을 <Fig. 7>에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 제안되어진 HS기반 정삼각형 조절기법은 왜곡된 초기형상을 매우 균일한 삼각형 격자로 재배열되었다.



<Fig. 7> Result shape of a Triangular network dome example

<Table 3> Analysis results of a triangular network dome example (Unit: m, m²)

		Initial	Results
Triangular mesh	Sum of area	1.5925E+01	1.5878E+01
	Ave. area	4.4236E-01	4.4106E-01
	SD of Area	9.1342E-02	8.0074E-03
	Sum of SDe	4.4926E+00	6.5035E-01
	Ave of SDe	1.2480E-01	1.8065E-02
	Edge SD	7.8104E-02	1.2413E-02
Grid member	Sum of length	6.4594E+01	6.3705E+01
	Ave. length	1.0253E+00	1.0112E+00
	Length SD	1.5039E-01	2.1116E-02

SD: Standard deviation

SDe: Standard deviation of Triangular Edge.

계산된 결과형상의 격자정보에 대해서 <Table 3>에 초기조건과 함께 나타내었다. 결과형상의 삼각형 면적합계는 15.878m², 평균면적 0.44106m²로 큰 변화가 없다. 그러나 면적편차는 0.0080074m²로 초기의 0.091342m²에 비해 매우 낮아졌다. 세변의 길이 편차합계도 0.65035m로 초기에 비해 3.8423m 낮아진 결과이며, 편차평균 0.018065m로 매우 낮게 나타났다. 격자부재도 길이 총 합은 큰 변화가 없지만 길이편차는 0.02116m로 매우 낮게 나타났다. 표준 편차와 면적 및 평균값들을 통해서 볼 때, 초기의 입력데이터에 의한 형상에 비해서 매우 균일한 삼각형 격자가 구현된 것임을 잘 알 수 있다.

4. 결 론

HS 알고리즘은 기존에 풀기 힘들었던 최적화 문제들을 쉽게 해결하는 방법을 제시하고 있으며, 본 논문에서는 정삼각형 네트워크 돔을 구현하기 위한 격자조절기법에 응용하였다. 해석모델로 채택된 네트워크 돔의 경우 왜곡된 형상에서 잘 정렬된 격자 구조를 얻을 수 있었으며, 확률변수 파라메타 스타디를 통하여 변수의 특성과 적합한 변수조건을 구할 수 있었다. 확률변수의 특성에서 HMCR은 1.0에 가까울수록 좋은 결과를 얻었고, 음원 저장에 대한 크기변수 HMS는 해석수렴시간에 큰 영향을 미치지 않는 결론을 얻을 수 있었다. 본 연구의 결과에서 HS기반 격자조절기법은 균질한 삼각형 네트워크 돔을 모델링하는데 적합함을 알 수 있었다. 또한 특정한 패턴의 도형에 대한 정량적 표현인 도형패턴 목적함수를 구현함으로써 다양한 자유형상곡면의 모델링에 적용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(12첨단도시C22) 및 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF 2014R1A2A1A01004473)임. 이에 감사드립니다.

References

1. Hwang, K.J. and Knippers, J. (2010) Stability of single layered grid shells with various connectors, Proceeding of the ICSA 2010 Guimaraes, Portugal, 163-164
2. Kato, S., Mutoh, I. and Shomura, M. (1994) Effect in joint rigidity on buckling strength of single layer lattice dome, Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 35(115), 101-109
3. Lopez, A., Puente, I. and Serna, M. (2007) Numerical model and experimental tests on

- single-later latticed domes with semi-rigid joints, *Computers and Structures*, Vol. 85(7-8), 360-374
4. Yamada, S., Matsumoto, Y., Sakamoto, A. and Croll, J.G.A. (2011) Design estimation method of buckling load and the associated mode for single layer lattice dome roof with square plan, *Proceeding of the IABSE-IASS 2011 symposium, London*, 72
 5. Shon, S.D., Kim, S.D., Lee, S.J. and Kim, J.S. (2011) A study on the critical point and bifurcation according to load mode of dome-typed space frame structures, *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 11(1), 121-130
 6. Lee, S.J. and Shon, S.D. (2012) Characteristics of buckling load and bifurcation in accordance with rise-span ratio of space truss considering initial imperfection, *Journal of Koran Society of Steel Construction*, Vol. 24(3), 337-348
 7. Lee, S.J. and Shon, S.D. (2014) A study on regular triangular mesh modeling of network dome using differential evolution algorithm, *Journal of Architectural Institute of Korea (Structure)*, Vol. 30(5), 13-20
 8. Shon, S.D. and Lee, S.J. (2011) Optimum structural design of sinusoidal corrugated web beam using real-valued genetic algorithm, *Journal of Koran Society of Steel Construction*, Vol. 23(5), 581-593
 9. Storn, R. (2008) Differential evolution research-trends and open questions, *Studies in Computational Intelligence*, Vol. 12(4), 187-194
 10. Das, S. and Suganthan, P.N. (2011) Differential evolution: A survey of the state-of-the-art, *Evolutionary computation, IEEE*, Vol. 15(1), 4-31
 11. Geem, Z.W., Kim, J.H. and Loganathan, G.V. (2001) A new heuristic optimization algorithm: harmony search, *Simulation* Vol. 76(2), 60-68.
 12. Lee, K.S. and Geem, Z.W. (2004) A new structural optimization method based on the harmony search algorithm, *Computers and Structures*, Vol. 82, 781-798
 13. Omran, M.G.H. and Mahdavi, M. (2008) Global-best harmony search, *Applied Math. and Comp.*, Vol. 198, 643-656
 14. Mahdavi, M., Fesanghary, M. and Damangir, E. (2007) An improved harmony search algorithm for solving optimization problems, *Applied Math. and Comp.*, Vol. 188, 1567-1579
 15. Pan Q.K., Suganthan, P.N., Liang, J.J. and Fatih Tasgetiren, M. (2010) A local-best harmony search algorithm with dynamic subpopulations, *Engineering Optimization*, Vol. 42(2), 101-117
 16. Wang, C.M. and Huang, Y.F. (2010) Self-adaptive harmony search algorithm for optimization, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, 2826-2837
 17. Pan, Q., Suganthan, P.N., Fatih Tasgetiren, M. and Liang, J.J. (2010) A self-adaptive global best harmony search algorithm for continuous optimization problems, *Applied Math. and Comp.*, Vol. 216, 830-848
 18. Das, S., Mukhopadhyay, A., Roy, A., Abraham, A. and Panigrahi, B.K. (2011) Exploratory Power of the Harmony Search Algorithm: Analysis and Improvements for Global Numerical Optimization, *IEEE Trans. on systems, man and cybernetics - Part B: Cybernetics*, Vol. 41(1), 89-106
 19. Yadav, P., Kumar, R., Panda, S.K. and Chang, C.S. (2012) An intelligent tuned Harmony Search algorithm for optimisation, *Information Sciences*, Vol. 196, 47-72
- Received : December 29, 2014
 - Revised : March 16, 2015
 - Accepted : March 16, 2015