

# 타원형 및 볼트복합형 스페이스 프레임 구조물의 형상 생성 및 최적화 방안

## Shape Generation and Optimization Technique of Space Frame Structures with Ellipse and Vault Complex Type

김 호 수\*                      박 영 신\*\*  
Kim, Ho-Soo                  Park, Young-Sin

### 요 약

대공간 스페이스 프레임 구조물은 구조물의 목적 및 설계자의 의도와 함께 다양한 형상으로 구성될 수 있으며, 다양한 구조물 형식에 적용될 수 있다. 그러나 이러한 대공간 스페이스 프레임 구조물의 최적의 부재크기나 형상은 구조 엔지니어의 경험과 반복적인 해석 그리고 시행착오적인 방법 때문에 그 결정이 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 설계자가 구조물의 최적 형상을 선택할 수 있는 방안을 제시하기 위해 먼저 타원형 및 볼트복합형과 같은 다양한 유형의 스페이스 프레임 구조물이 선정되며, 절점, 좌표 및 부재 생성을 위한 형상생성방법이 고려된다. 또한 스페이스 프레임 구조의 최적설계 절차에서 각 절점 좌표는 높이 변화나 링의 개수에 따라 변하게 되므로 최적설계 과정에서 절점과 부재의 자동생성기법이 적용된다. 다음으로 형상생성방법을 기반으로 한 형상생성모듈은 구조물의 최적화 단계에 앞서 설계자가 원하는 형상을 생성해주는 모듈이며, 최적화 단계에서는 해석 모듈과 최적화 모듈이 연계된다. 마지막으로 예제 모델을 통해 형상생성방안 및 최적설계 방안의 효율성을 검토한다.

### Abstract

Space frame structures are included in the large spatial structures and can adopt various structure types. But, it is not easy to choose the optimal member size and shape because it depends on the structural engineer's experience and the repeated trial and error. Therefore, in this study, the final goal is to help the designer with the selection of the optimum shape. First, various space frame structures with ellipse dome and vault complex types are chosen and the shape generation method is considered to generate the nodes, coordinates and members. In optimal design process of space frame structure, each node coordinate changes according to height variation or the number of rings. Therefore, the auto generation technique of nodes and members is required in order to consider this phenomenon in optimal design process. Next, the shape generation module is created, base on the shape generation method. This module is connected with the analysis module and the optimization algorithm. Finally, the example model is presented for the evaluation of the efficiency of optimization algorithms.

키워드 : 스페이스 프레임, 타원형, 볼트복합형, 형상생성기법, 최적화 모듈

Keywords : Space Frame, Ellipse Type, Vault Complex Type, Shape Generation Technique, Optimization Module

## 1. 서 론

최근 국내에서는 복합문화 및 체육공간 구조물에 대한 사회적인 요구에 따라 대공간 구조물에 대한 관심이 급증하고 있다. 이러한 대공간 구조물에는 구조물의 디자인과 목적 그리고 부재형상 및 주용

력에 따라 막구조, 케이블 트러스 복합구조 그리고 스페이스 프레임 등이 사용되고 있으며, 이 중 스페이스 프레임 구조물은 입체적인 배열의 규칙성과 반복적인 형태로부터 나타나는 형상의 아름다움이 그 자체로 인테리어적인 요소로 사용된다는 것과 구성부재의 경량화와 함께 제작기술의 공업화 등의 장점으로 인해 폭넓게 사용되고 있다. 이러한 대공간 스페이스 프레임 구조물은 구조물의 목적 및 설계자의 의도와 함께 다양한 형상으로 구성될 수 있으며, 이와 같은 형상생성을 위한 구조설계 및 해석

\* 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사(교신저자)  
Tel: 043-229-8483 Fax: 043-229-8483  
E-mail : hskim@cju.ac.kr

\*\* 청주대학교 건축공학과 박사과정

과정에서 구조물의 안전성 확보와 동시에 경제성 향상을 위한 최적화 단계가 필수적이다. 일반적으로 구조물의 최적화는 시스템에 따라 목적함수가 다르게 적용되지만 대부분 경제성 향상에 초점을 맞추고 있으며, 이에 따라 구조물의 중량을 목적함수로 하는 경우가 대부분이다. 그러나 이미 모델링된 구조물의 최적화라는 것은 부재크기의 최적화 정도에만 적용되기 때문에 완전한 최적화라 할 수 없으며, 설사 형상 최적화를 실시하려해도 구조물을 다시 모델링해야 하기 때문에 범용 구조해석 프로그램에서 재모델링과 구조해석을 실시하는 것은 비효율적이다. 따라서 스페이스 프레임 구조물의 최적화 단계에서 정해진 설계변수의 변화에 따라 변화된 형상을 표현하기 위해서는 별도의 형상 모델링 방법이 필요하다.

이러한 스페이스 프레임 구조물에 대한 형상생성 및 최적화 문제는 이미 여러 연구자들에 의해 그 중요성이 인식되어 왔으며, 이에 대한 연구를 살펴보면 이경수, 한상을<sup>15)</sup>은 형상결정방법을 제시하였으나 돔형, 즉 원형 구조물에 국한되어 있으며, 형상의 생성원리를 수식으로 표현하고 있지 않기 때문에 형상최적화 문제에 대한 정량적인 접근이 쉽지 않다. 또한 최근 윤병욱<sup>9)</sup>은 NURBS를 기반으로한 3D 모델링 프로그램을 개발하고 이를 이용한 자유 형태를 모델링하는 기법을 제안하였으나 이를 통한 형상 및 크기 최적화시 다양한 설계변수 적용에 어려움이 존재한다.

Kameshki, Saka<sup>8)</sup>는 돔형 구조물 중 지오데식 돔(Geodesic Dome)의 형상생성원리를 수식으로 정리하고 이를 최적화단계에 적용하고자 하였다. 그리고 이승창<sup>13)</sup>, 석창목<sup>14)</sup>, 손수덕<sup>16)</sup>은 여러 형상에 대해 최적화를 실시하고자 하였으나 타원형 및 볼트복합형에 대한 형상생성원리 및 설계변수적용이 고려되지 못한 점이 있다.

특히, 대공간 구조물은 대지의 형태와 구조물의 목적에 따라 기본적인 형상이 결정되는데, 대부분은 그 형태가 정방형보다 장방형 구조물로 구성되고 있다. 따라서 이를 효과적으로 반영하기 위해서는 기존의 원형돔을 발전시킨 타원형 및 볼트복합형 돔 구조의 형상생성 및 이의 활용방안이 고려되어

야 한다.

따라서 본 연구에서는 타원형 및 볼트복합형을 중심으로 스페이스 프레임의 다양한 형태에 따른 형상생성 원리 및 정식화 방안을 강구하여 각각의 형상들을 체계적으로 모델링할 수 있는 방법을 제안하고 이를 구조해석 및 최적화 단계에 적용하여 최적의 형상을 도출하고자 한다. 이를 위해 먼저 타원형 및 볼트복합형의 다양한 형상의 생성원리를 정식화 과정을 통해 설명하고 이를 최적화 단계에 적용하여 형상생성방안의 효율성을 검토하고자 한다.

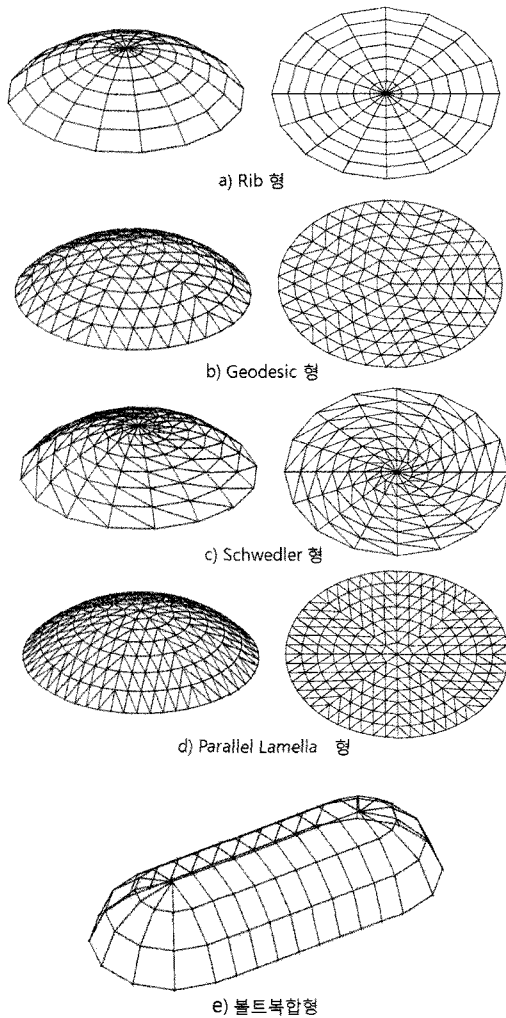
## 2. 타원형 및 볼트복합형의 형상결정 원리

### 2.1 형상의 종류와 형상결정요소

본 연구에서는 타원형 및 볼트복합형 스페이스 프레임에 대한 형상결정원리를 정식화하고 이를 최적화 단계에 적용함으로써 형상최적화를 구현하고자 한다. 이를 위해 기존의 연구<sup>10),11)</sup>를 바탕으로 원형돔 형태를 발전시켜 타원형 및 볼트복합형을 결정하는 형상결정 요소를 <표 1>과 같이 표현하였으며, 이에 따른 여러 유형의 형태는 <그림 1>과 같다. <그림 1>의 타원형돔의 경우 절점수와 부재연결방법 등의 차이에 따라 다양한 형상이 나타나며, 특히 부재연결방법에 의해 돔의 디자인과 이름이 결정된다. 또한 이러한 결정요소 이외에 공통적인 형상결정요소로는 가로 직경(Lx), 세로 직경(Ly), 링의 개수(nring) 그리고 높이(H)가 있다.

<표 1> 타원형 및 볼트복합형의 형상결정요소

모델	형상결정요소
타원형	가로 직경(Lx), 세로 직경(Ly), 링 개수(nring), 높이(H)
볼트복합형	볼트의 가로 길이(Lx), 볼트의 세로 길이(Ly), 볼트의 가로 분할수(Dx), 볼트의 세로 분할수(Dy), 높이(H)



〈그림 1〉 타원형 및 볼트복합형 스페이스 프레임의 형태

원형돔에 대해서는 이미 기존연구<sup>10)</sup>에서 리브돔(Rib Dome), 지오데식돔(Geodesic Dome), 패러렐 라멜라 돔(Parallel Lamella Dome) 그리고 슈베들러 돔(Schwedler Dome)의 형상생성 방안을 제시한 바 있다. 이러한 원형돔의 형태를 발전시킨 타원형 돔의 경우 x-y평면에서 가로, 세로 길이가 다르기 때문에 직경이 아닌 가로 직경(Lx)와 세로 직경(Ly)를 적용한다는 점의 차이만 있을 뿐 기본적으로 원형돔과 비슷한 형상결정 원리를 가지므로 기존의 원형돔 연구를 바탕으로 타원형돔의 부재연결방법을 고려하였다.

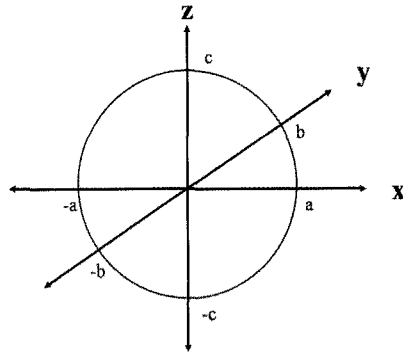
또한 <그림 1>의 볼트복합형은 타원형돔과 볼트구조가 결합된 형상으로 고려하였다. 특히 볼트복합형은 타원형돔과 마찬가지로 다양한 부재연결 방법이 고려될 수 있으며, 타원형돔과의 특성비교를 위

해 단층(Single-layer)으로 구성하였다.

또한 각 구조물의 형상결정요소는 형상을 구성하는 것 뿐만 아니라 최적화 단계에서 설계변수로 적용가능하며, 형상생성원리는 절점번호 생성, 절점좌표 생성 그리고 부재생성의 순으로 이루어진다.

## 2.2 타원형돔의 형상생성원리

일반적으로 원형돔 및 타원형돔 스페이스 프레임 구조물은 구면(Sphere)과 타원면(Ellipsoid)<sup>3)</sup>에 기초하여 만들어진다. 이 두 형태는 약간의 차이는 있지만 각 축에 대해 대칭적이며 <그림 2>와 같은 기본 구면에서 (1)식과 같이 표현 가능하다.



〈그림 2〉 구면(Sphere)의 기본 형상

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (1)$$

구면과 타원면에서 구조물의 형태는 c값의 양의 부분만을 사용하며, a 및 b, c 값에 따라 다양한 형태가 생성된다. 즉, a, b, c의 값이 모두 같은 경우에는 정확한 반구의 형태가 되며, 모두 다른 경우 타원형돔이 된다. 일반적으로 돔형 구조물의 경우 정확한 반구의 형태일 필요는 없으므로 사용자의 목적에 따라 다른 값을 적용할 수 있다.

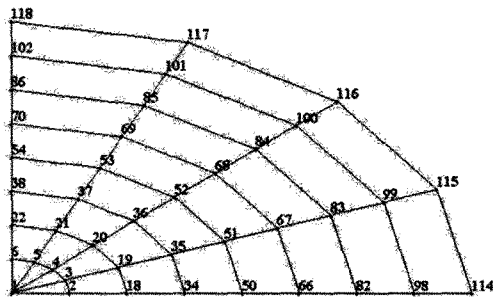
타원형돔의 형상결정요소로는 가로 직경(Lx), 세로 직경(Ly), 링 개수(nring) 그리고 높이(H)가 필요하며 시작점(start\_joint) 개념을 도입함으로써 (2)식과 같이 구조물 중심인 1번 절점은 0번째 링 위에 있으며, 2번 절점은 1번 링 위에 있음을 결정한다.

$$\begin{aligned} s\_joint(0) &= 1 \\ s\_joint(1) &= 2 \end{aligned} \quad (2)$$

즉, 돔의 절점번호 생성과 좌표를 구하기 위해 전체적으로 도입되는 가장 중요한 개념은 각 돔의 1번 절점은 구조물의 중앙에 위치하며 동시에 높이  $H$ 를 그 절점의  $z$ 좌표로 한다는 것과 2번 절점은 1번 절점에서  $x$ 축 오른쪽 방향으로 생성된다는 것 그리고 돔 구조물의 절점생성을 위한 기준은 1번 절점을 기준으로  $x$ 축 오른쪽 방향 선과 각 링과의 교차점이라는 것이다.

각 돔 형상의 절점번호 생성을 위해 그 형태를 살펴보면 1번 절점을 중심으로 한  $360^\circ$  원을 각각 지오데식 돔은 5개, 패러렐 라멜라 돔은 8개, 슈베들러 돔과 리브 돔은 16개로 분할하고 있다.

<그림 3>은 링 개수가 8개인 리브돔의 부재연결 방법이 적용된 타원형돔 스페이스 프레임 구조물의 부분 평면도이며, 시작점 번호의 규칙적인 성질을 이용하여 <그림 4>와 같이 각 돔의 형태에서 링번호에 따른 시작점 번호를 알 수 있다.



<그림 3> 타원형돔 스페이스 프레임 구조물의 부분 평면도

```

do i=3, nring+2
  select case(no_ellipse)
    case (1)
      start_joint(i)=start_joint(i-1) + 5 x (i-2);
    case (2)
      start_joint(i)=start_joint(i-1) + 16;
    case (3)
      start_joint(i)=start_joint(i-1) + 8 x (i-2);
    case (4)
      start_joint(i)=start_joint(i-1) + 16;
  end select
end do
    
```

<그림 4> 타원형돔 형상의 시작점 번호산정 흐름도

<그림 4>에서 CASE (1),(2),(3),(4)는 각각 지오데식 돔, 리브 돔, 패러렐 라멜라 돔 그리고 슈베들러 돔 형태의 타원형 돔이며, 여기서  $i$ 는 링의 번호이다. 0번 링( $i=1$ )과 1번 링( $i=2$ )의 시작점은 고정값으로 주어졌기 때문에 나머지 링의 시작점 번호를 구할 수 있다. 또한 각 링의 시작점은 그 링 위 절점번호의 처음을 뜻하므로 제외된 고정값 만큼을 추가한 링 개수, 즉  $nring+2$ 만큼을 반복하면 전체 절점수를 구할 수 있다. 이렇게 전체 절점수가 결정되면 각 절점의 좌표를 생성하게 된다. 이것은 (1)식을 이용하게 되며 <그림 5>와 같은 흐름도를 통해 사이각  $\theta$  (theta)를 적용한다.

```

do i=2, nring+1
  s_num=start_joint(i);
  e_num=start_joint(i+1);
  num=e_num-s_num
  do j=1, num
    k=k+1;
    select case(no_ellipse)
      case (1)
        theta=360 x (k-s_num) / (5 x (i-1));
      case (2)
        theta=(360 / 16) x (k-s_num);
      case (3)
        theta=360 x (k-s_num) / (8 x (i-1));
      case (4)
        theta=(360 / 16) x (k-s_num);
    end select
    if (theta <=180) then
      x_coord(k)
      y_coord(k)
    else
      x_coord(k)
      y_coord(k)
    end if
  end do
  z_coord(s_num)
  z_coord(e_num+1:e_num-1)
end do
    
```

<그림 5> 타원형 돔 형상의 사이각 및 좌표 산정의 흐름도

여기서  $s\_num$ 은 링 번호  $i$ 에서의 시작점 번호,  $e\_num$ 은 링 번호  $i+1$ 에서 시작점 번호이므로 두 값의 차  $num$ 은  $i$ 에서의 절점 수이다.  $\theta$ (theta) 값은 중앙의  $360$ 도 각을 타원형 돔의 형태에 따라 동일한 각으로 나누며, 절점 번호의 위치에 맞게 곱해지는 수순을 따르고 있다. 이렇게 구해진 사이각  $\theta$  (theta) 값은 다음 단계에서 (3)식을 이용하여  $x, y$ 좌표를 구한다.

$$x\_coord(k) = D_u \times nr \times \cos(\theta)$$

$$y\_coord(k) = \sqrt{\left(1 - \frac{x\_coord(k)^2}{D_u^2}\right) \times (D_b \times nr)^2} \quad (3)$$

여기서  $Da, Db$ 는 가로 및 세로 링 간격이며,  $nr$ 은 좌표  $k$ 가 위치한 링 번호이다.

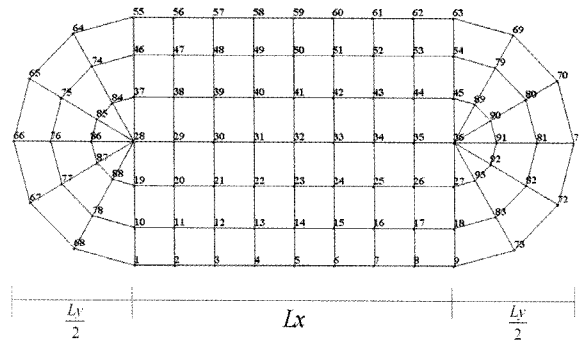
$z$ 좌표의 경우 각 링 위에 존재하는 절점의 좌표는 동일하므로, 각 링에서 시작점을 기준으로 구하며 이는 (4)식과 같다.

$$z\_coord(i) = \sqrt{\left(1 - \frac{x\_coord(s\_joint(r))^2}{a^2}\right) \times H^2} \quad (4)$$

타원형돔의 부재생성은 돔형과 마찬가지로 링재를 연결하고 그 다음 직선재를 연결한 뒤, 마지막으로 부사재를 연결하는 순서로 부재생성을 완료한다.

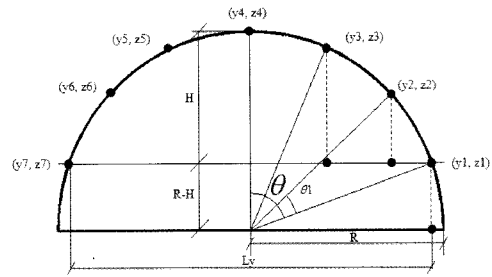
### 2.3 볼트복합형의 형상생성원리

볼트복합형의 경우 기존연구<sup>11)</sup>에서 제시된 볼트형을 먼저 생성한 뒤 돔의 일부분을 추가 생성하여 연결하는 방식을 취한다. 본 연구에서는 단층형 볼트복합형을 고려하였다. 잘려진 돔형의 형태에도 돔형상의 종류와 같이 다양한 형태가 있을 수 있으나 기본적으로 <그림 6>과 같은 리브돔의 형태를 사용한다.



<그림 6> 볼트복합형 스페이스 프레임 구조물의 평면도

볼트복합형 스페이스 프레임 구조는  $Lx$ 의 가로 길이를 가지는 볼트형 구조에  $Ly$ 를 지름으로 갖는 반원이 좌우에 결합되는 형태가 되기 때문에 전체 길이는  $Lx+Ly$ 를 갖는다. 이러한 형태의 모델링을 위해서는 <그림 7>과 같은 볼트복합형의 절점위치 결정방법이 필요하다.



<그림 7> 볼트복합형의 절점위치결정

<그림 7>을 살펴보면  $y_i$ 와  $z_i$ 가 입면도의 중앙을 축으로 대칭인 것을 알 수 있다.  $y$ 좌표를 살펴보면  $y_7$ 은  $L_y - y_1$ 과 좌표가 같으며  $y_6$ 은  $L_y - y_2$ 와 같다. 또한  $z$ 좌표를 살펴보면  $z_1$ 과  $z_7$ ,  $z_2$ 과  $z_6$  등이 같은 것을 알 수 있다. 볼트복합형은  $y-z$ 축을 기준으로 생성된 절점의 좌표가  $x$ 축 방향으로 동일하게 적용된다. 따라서 전체 절점생성 과정에서 볼트 위의  $y$ 좌표 및  $z$ 좌표는 각 위치에서 한번만 계산됨과 동시에 최적설계 과정 중 메모리 효율성 문제를 해결한다. 또한 이러한 성질을 이용하여  $y-z$ 평면에서 중심축을 기준으로 각 절점까지의 길이를 반지름으로 하는 호와 그 위에 위치하는 절점을 생성할 수 있다. 먼저 생성되는 모든 좌표는 상부판을 기준으로 생성되며 좌측에 생성되는 돔부분의 좌표는 (5)식과 같다.

$$\begin{aligned} x\_coord(i) &= -(Y(D_y + 2 - i) - Y(i))/2 \times \sin(i \times 30) \\ y\_coord(i) &= (L_y/2) + (Y(D_y + 2 - i) - Y(i))/2 \\ &\quad \times \cos(i \times 30) \\ z\_coord(i) &= Z(i) \end{aligned} \quad (5)$$

$Y$ 값은 <그림 7>에서 구한 볼트 위의  $y$ 좌표이며, 돔 부분의 반지름을 구하기 위해 사용된다.

$Z$ 값은 괄호안의 번호가 위치하는  $z$ 좌표이며 이는 같은 호 위에 위치하는 절점의  $z$ 좌표 값이 같음을 의미한다. 이에 따라 전체 절점수는 (6)식과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} Num\_Node &= (D_x + 1) \times (D_y + 1) \\ &\quad + 10 \times (real((D_y + 1)/2)) \end{aligned} \quad (6)$$

이것은 기존의 볼트형 구조물의 전체 절점수에

좌·우측에 생성되는 절점의 수를 더한 것이다. 이때 세로축 분할 수에 따라 부재수가 변하므로 real 함수를 사용하여 실수를 반올림 정수로 사용하도록 하였다.

부재연결의 경우 기존 볼트형 구조에 위치하는 부재를 연결한 뒤, 부가적으로 생성된 좌·우측 뚫부분의 링재가 연결된다.

### 3. 최적설계를 위한 구성 모듈

타원형돔 및 볼트복합형 스페이스 프레임 구조물에 대한 최적의 형상을 도출하기 위한 최적설계 모듈은 Modeling Module, Analysis Module 및 Optimization Module의 세가지 모듈로 구성된다. 여기서 Modeling Module은 스페이스 프레임 형상의 최적화 단계의 초기에 화면의 메뉴를 선택하여 작업을 지시하는 GUI의 형태로 실행하게 되며, 이후 최적화 단계에서는 각 단계마다 알고리즘만이 사용된다. 또한 개발된 모듈에서는 스페이스 프레임 구조물의 구조해석을 위해서 먼저 좌표계의 설정이 선행되며, 구조물의 전체 강성행렬을 구하여 구조물의 절점에 작용하는 힘과 각 절점에서의 변위와의 관계를 알아내는 직접 강성법<sup>7)</sup>이 적용되었다. 이러한 Analysis Module은 Optimization Module과 연결되기 때문에 본 연구에서 Optimization Tool로 채택하고 있는 DOT<sup>5)</sup>와의 연계성을 고려하여 구성되어 있다. 최종적으로 스페이스 프레임 구조물의 형상 최적화를 위한 알고리즘은 Optimization module을 통해 <그림 8>과 같이 적용된다.

1) Modeling Module을 통해 원하는 형상을 모델링하며, 미리 입력된 입력데이터에서 최적설계에 필요한 관련정보를 읽는다.

2) Analysis Module을 통해 주어진 초기 형상에 대한 구조해석을 수행한다.

3) Optimization Module에서 최적화를 위한 설계변수의 조합 및 최적설계방법을 선택한다.

4) 목적함수를 계산하고 구조해석결과를 이용하여 응력과 변위에 대한 구속조건들을 지정한다.

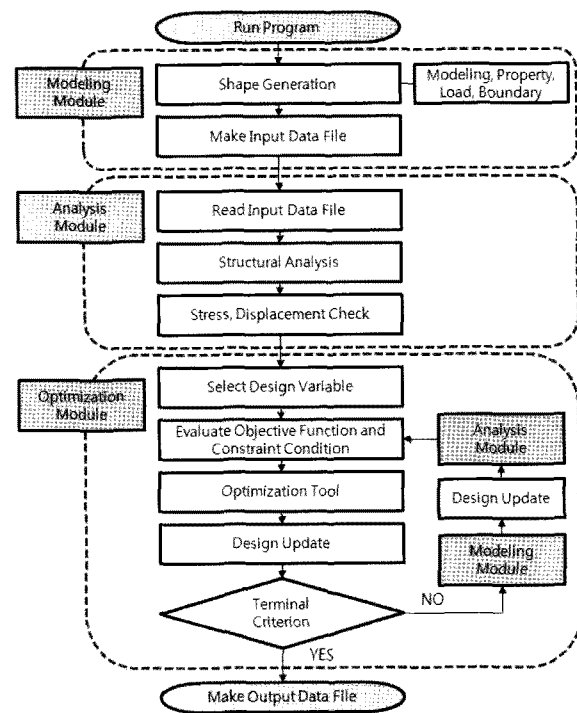
5) 최적화 Tool인 DOT<sup>5)</sup>를 이용하여 최적설계를 수행한다. DOT에서는 3가지의 Optimization Method를 제공하고 있으며, 이 중 연속선형 근사

계획법(SLP)을 사용하였다.

6) 각 단계의 최적설계 결과를 이용하여 부재크기 및 Modeling Module의 알고리즘을 이용하여 구조물의 형태변화에 대한 데이터를 자동생성하여 업데이트한다.

7) 수렴조건에 만족할 때까지 구조해석과 최적설계를 반복수행한다.

8) 수렴조건에 만족하면 설계기준에 따른 검토를 수행하고 최적설계결과를 Output Data File로 생성한다.



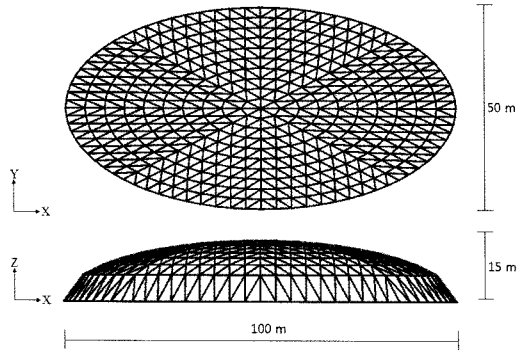
<그림 8> 형상 최적화 흐름도

### 4. 예제모델을 통한 형상생성 및 최적화 방안

2장에서 제시된 형상결정원리와 이에 대한 최적 모듈을 통해 스페이스 프레임 구조물의 최적형상을 검토하고자 한다. 이를 위해 전체 가로 길이 100m, 세로 길이 50m 높이 15m를 갖는 타원형돔 및 볼트 복합형의 예제모델이 고려되었으며, 부재의 그룹화에 따른 최적설계의 효율성과 높이 변화에 따른 최적 중량을 비교하였다.

### 4.1 타원형돔 모델

먼저 4가지 타원형돔 모델에 대하여 <표 2>와 같은 조건을 적용하여 모델링한 후 최적화를 수행하였다. <그림 9>는 예제 모델 중 패러렐 라멜라 타원형돔의 형상이다.



<그림 9> 타원형 돔 모델의 형상

적용모델의 크기는 타원형돔의 형태를 고려하여 가로 및 세로 길이를 달리하였으며, 높이는 15m, 링의 개수는 10개로 설정하였다. 구조물의 형태는 Single Layer로 구성되며, 마지막 링 위의 절점을 지점으로 하여 힌지조건을 설정하였다.

<표 2> 타원형돔 모델의 개요

항목	적용 내용
가로길이 $D_a$	100m
세로길이 $D_b$	50m
타원의 높이 $h$	15m
링 개수 $n_r$	10개
Layer 형태	Single Layer
지점조건	마지막 링 위의 절점을 힌지지점으로 가정
절점 접합부 조건	plate connector
하중조건	1번 절점에 수직하중 500kN

또한 부재의 접합부 조건은 plate connector로 가정하여 유효좌굴길이계수 K값은 1.0으로 하였고 지점조건인 경우 최하부 링에서 힌지지점으로 가정하였다. 초기부재는 KS규격<sup>1)</sup>에서 주어진 SS400 원형 강관 P-190.7×4.5 부재로 설정하였는데, 본 연구에서는 최적화에 미치는 각 설계변수의 영향을 또 다른 각도에서 살펴보기 위해 초기값을 과대설정하는 대신 작은 값으로 정하였다. 최적설계의 효율성을

검증하기 위해 적용하중은 최상부 1번 절점에 수직 하중 500kN을 받는 것으로 가정하였다. 목적함수는 전체 구조물의 중량, 설계변수는 타원형의 형상결정 요소 중 높이와 부재크기를 채택하였다. 제한조건으로 응력은 부재설계기준에 따른 허용응력 범위를 넘지 못하도록 설정하였으며, 절점의 변위는 모든 절점의 변위가 제한변위를 넘지 못하도록 설정하였다. 본 적용예제에서는 수직제한변위가 스패길이의 1/700인 14.3cm로 설정하였다. 또한 그룹핑 개수 및 높이 변화에 따른 물량 변화 및 영향을 검토하기 위해 <표 3>과 같이 6가지 경우를 설정하여 최적설계를 수행하였다.

<표 3> CASE 별 적용 설계변수

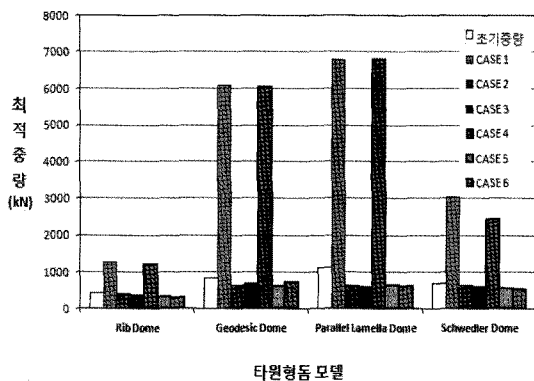
CASE	적용 설계변수	Grouping 개수
CASE 1	단면적 A	1
CASE 2	단면적 A	10
CASE 3	단면적 A	20
CASE 4	단면적 A + 높이 H	1
CASE 5	단면적 A + 높이 H	10
CASE 6	단면적 A + 높이 H	20

일반적으로 부재의 종류를 다양하게 적용할 경우 더 좋은 최적설계 결과가 예상되지만, 본 적용모델에서는 시공성을 고려하여 세 가지 경우의 그룹핑을 실시하였다. CASE 1과 CASE 4는 구조물의 전체 부재가 동일한 크기의 단일 부재로 이루어지는 경우이며, CASE 2와 CASE 5는 근접한 사재와 링재를 동일한 부재로 구성하여 10개로 그룹핑하였고, CASE 3과 CASE 6은 링재와 사재를 각각 다른 크기의 부재로 구성하여 20개로 그룹핑한 경우이다. 또한 CASE 1~3은 설계변수로 단면적 A만을 적용한 경우이며, CASE 4~6은 단면적 A와 높이 H의 변화를 동시에 고려한 경우이다.

<그림 10>은 각 예제모델에 대한 초기중량 및 부재 그룹화 그리고 설계변수 적용에 따른 최적중량 그래프이며 <표 4>는 CASE별 최적중량 결과, <표 5>는 그룹핑 개수를 1개로 설정한 CASE 1과 CASE 4의 최적설계 후 설계변수의 변화를 나타내고 있다. 그룹핑 개수를 1개로 설정한 CASE 1과 CASE 4를

살펴보면 최적화 후 초기중량보다 더 큰 중량을 나타내고 있다. 이는 예제모델의 기본 설계가 최적의 형태가 아님을 증명하는 것으로써 부재의 용력이 허용용력에 만족하지 않았음을 알 수 있다. 대부분의 CASE에서 다양한 그룹핑과 함께 높이와 부재크기를 동시에 설계변수로 채택한 CASE에서 더 적은 최적중량을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 각 형태에 대해 CASE 1을 기준으로하여 최적중량의 절감효과를 비교해보면 리브돔은 최대 76%, 지오데식돔은 90%, 패러렐 라멜라 돔은 91% 그리고 슈베들러 돔은 82%의 절감효과를 나타냈다.

또한 적용된 모델유형에 따라 설계변수 및 그룹핑 개수의 영향이 미묘한 차이지만 조금 다르게 나타났다. 단면의 그룹화 설정시 링재와 사재의 길이가 거의 동일하게 모델링된 리브돔 및 슈베들러돔은 설계변수 및 그룹핑 개수가 많을수록 중량 절감효과가 커지는 결과를 나타냈으나, 링재와 사재의 길이에 차이가 있는 지오데식돔 및 패러렐 라멜라 돔은 약간 다르게 나타났다. 이는 구조물의 전체 중량이 단면의 크기 뿐만 아니라 설계변수로 적용된 구조물의 높이 변화시 동시에 변하는 부재 길이에 영향을 받으며, 이 때 그룹핑 방법 및 단면 개수에 따라 그리고 용력이 집중되는 위치의 단면 크기 변화에 영향을 받는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 부재 그룹핑시 링재와 사재로 구분하여 그룹화하였는데 최적설계시 최적의 중량절감효과를 가져오기 위해서는 구조물의 형태와 함께 부재의 그룹핑 방법 및 그룹핑 개수를 고려할 필요가 있음을 알 수 있다.



〈그림 10〉 타원형돔의 초기 및 최적 중량 비교

〈표 4〉 CASE 별 최적중량

모델	초기 중량 (kN)	CASE 1 (kN)	CASE 2 (kN)	CASE 3 (kN)	CASE 4 (kN)	CASE 5 (kN)	CASE 6 (kN)
Rib	418.6	1262.1	401.7	387.6	1230.5	338.1	305.9
Geodesic	846.9	6092.1	636.2	685.5	6044.4	614.9	746.8
Parallel Lamella	1120.2	6780.1	627.1	592.6	6805.3	640.1	607.5
Schwedler	701.3	3033.9	640.6	605.9	2432.4	563.1	537.7

〈표 5〉 CASE 1과 4의 최적설계 후 설계변수 변화

모델	CASE 1 (설계변수 : A)	CASE 4 (설계변수 : A+H)	
	단면(cm)	단면(cm)	높이(cm)
Rib	36.6 × 0.8	29.8 × 0.7	4951
Geodesic	51.1 × 1.2	51.9 × 1.2	1146
Parallel Lamella	46.9 × 1.1	48.6 × 1.1	1017
Schwedler	39.7 × 0.9	32.5 × 0.8	4872

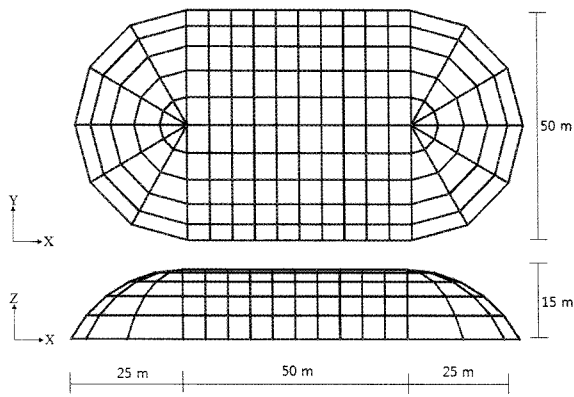
### 4.2 볼트복합형 모델

〈그림 11〉 및 〈표 6〉과 같은 볼트복합형 스페이스 프레임의 해석모델을 고려하였다. 여기서 초기부재 및 접합부 조건은 타원형 적용모델과 같으며 지점조건의 경우 볼트 부분의 y축 기준 상·하 2개의 외측면과 돔 부분의 외곽부분을 힌지지점으로 가정하였다. 적용하중은 볼트복합형의 구조 중 볼트 부분에 수직하중 2.5 kN/m<sup>2</sup>을 받는 것으로 가정하였다. 초기부재는 타원형 구조물과 같은 SS400 원형 강관 P-190.7×4.5 부재로 설정하였으며, 이렇게 적용된 구조물의 총 중량은 407.7 kN이다. 수직제한변위는 스패길이의 1/700인 14.3 cm로 설정하였다.

〈표 6〉 적용 모델의 개요

항목	적용 내용
하부판 x 스패길이	전체 가로길이 : 100m (볼트 길이 : 50m)
하부판 y 스패길이	50m
하부판 높이(H)	15m
볼트 부분 분할수	가로 : 10, 세로 : 10
지점조건	평판의 2면, 돔의 외곽 부분이 힌지지점
하중조건	볼트 부분에 수직하중 2.5 kN/m <sup>2</sup>





〈그림 11〉 볼트복합형 모델의 형상

볼트복합형 스페이스 프레임을 구성하는 단면적(A), 하부관 높이(H), 격자 분할수(Div)를 설계변수로 설정하고 각각의 변화에 따른 물량 변화 및 영향을 검토하기 위하여 <표 7>과 같이 4가지 경우를 설정하여 최적설계를 수행하였다.

〈표 7〉 CASE 별 적용 설계변수

CASE	적용 설계변수	목표변위
CASE 1	A	14.3 cm ( $\frac{L}{700}$ )
CASE 2	A + H	
CASE 3	A + Div	
CASE 4	A + H + Div	

<표 8>은 최적설계결과를 나타낸 것인데, CASE 1을 기준으로 CASE 2의 경우 61%, CASE 3의 경우 10%, CASE 4의 경우 65%의 중량절감효과가 있는 것으로 나타났다. 적용 모델에 따라 중량절감효과 정도는 차이가 있을 수 있지만 이는 부재의 단면크기 뿐만 아니라 격자분할 수나 볼트복합형 스페이스 프레임의 전체 높이가 구조물의 최적중량에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한, 부재크기와 함께 전체 높이나 격자분할 수만을 설계변수로 한 CASE 2나 3보다 모든 설계변수를 고려한 CASE 4의 경우에서 더욱 큰 중량절감효과가 나타났다. 그러나 본 예제에서 단면적과 격자분할 수만을 적용한 CASE에서는 중량 절감 효과가 크지 않게 나타났다. 이것은 본 연구에서 제시한 볼트복합형의 형상생성 원리의 결과로 판단된다. 형상생성 원리에서 구조물의 좌·우측의 동형의 링 개수가 볼트부분의 분할 수와 연결되어 있기 때문에 본 예제의 경우 분할 수가 줄어들면서 링 개수 또한 줄어들었으며 동시에 길어진 부재가 받는 응력이 커졌기 때문에 결

과적으로 단면의 크기가 커져 전체 중량의 절감효과가 적은 것으로 판단된다.

〈표 8〉 CASE 별 최적설계 결과

모델	최적제어변위 (cm)	최대응력비	최적높이 H(cm)	분할수 Div(개)	최적중량 (kN)	중량비
CASE 1	13.88	1.0	1500.0	10×10	2195.4	1.00
CASE 2	14.30	0.9	866.4	10×10	875.2	0.39
CASE 3	7.21	1.0	1500.0	6×9	1988.9	0.90
CASE 4	14.3	1.0	743.1	12×9	788.9	0.35

## 5. 결론

본 연구에서는 타원형 및 볼트복합형 스페이스 프레임 구조물을 중심으로 다양한 형태에 따른 형상생성 원리 및 정식화 방안을 강구하여 각각의 형상들을 체계적으로 모델링할 수 있는 방법을 제안하였으며 이를 구조해석 및 최적화 단계에 적용하여 최적의 형상을 도출하기 위해 타원형돔 및 볼트복합형 예제 모델에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제안된 절점 및 부재 생성 방안을 이용하여 기존의 원형돔의 형상생성원리를 발전시켜 타원형돔과 볼트복합형의 형상을 체계적으로 모델링할 수 있었으며 형상결정을 위한 정식화를 구현하였다.
- 2) 제안된 형상생성원리를 적용한 형상생성 모듈을 통하여 설계자가 원하는 형상의 다양한 스페이스 프레임 구조물을 모델링할 수 있었다. 그리고 구조형태의 형상결정요소를 최적서례시 설계변수로 적용하여 크기 및 형상최적설계를 구현하였다. 또한 형상생성모듈을 최적화 모듈에 적용하여 최적화 단계마다 설계변수의 변화에 따른 변화된 형상을 얻을 수 있었다.
- 3) 타원형돔과 볼트복합형의 예제모델에서 최적화된 결과를 살펴보면, 최적설계시 최적의 중량절감효과를 가져오기 위해서는 설계변수 변화뿐만 아니라 구조물의 형태와 함께 부재의 그룹핑 방법 및 그룹핑 개수를 고려할 필요가 있음을 알 수 있다.
- 4) 형태에 따른 형상생성원리가 구조물의 최적설계에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 타원형돔 및 볼트복합형 스페이스 프레임 구조물의

최적설계 뿐만 아니라 다른 형태의 최적설계시에도 효율적인 형상생성방법은 더 나은 최적설계 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

5) 이와 같이 본 연구에서 제시한 형태를 포함하여 다양한 형태의 형상생성방법을 강구하고 이를 Modeling Module에 적용하면 실무에서 스페이스 프레임의 최적설계시 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 한국강구조학회, KBC 2009 강구조설계, 2009
2. 성활경, 최적설계 기초편, 도서출판 폴드, 2005
3. Shoshichi Kobayashi, 곡선과 곡면의 미분기하학, 청문각, 1998
4. G.S. Ramaswamy, M Eekhout, G R Suresh, Analysis, design and construction of steel space frames. Thomas Telford, 2002
5. Vanderplaats Research & Deveopment, Inc, Design Optimization Tools, 2001
6. John Chilton, Space Grid Structures, 2000
7. I.M.Smith, D.V.Griffiths, Programming the Finite Element Method, John Wiley & Sons, 1998
8. E.S. Kameshki, M.P. Saka, Optimum geometry design of nonlinear braced domes using genetic algorithm, Computers and Structures, 2007
9. 윤병욱, 나유미, 이재홍, 3D 모델링 프로그램을 이용한 프리폼 구조시스템 모델링 기법, 한국공간구조학회 학술발표회 논문집, 7권, 1호, 2010
10. 김호수, 박영신, 양명규, 이한주, 스페이스 프레임 돔 구조물의 최적화를 위한 형상생성 방안, 대한건축학회 논문집, 25권 12호, 2009
11. 김호수, 박영신, 이한주, 수학적 계획법을 이용한 복층 볼트시스템의 구조최적화 방안, 대한건축학회 논문집, 25권, 10호, 2009
12. 김호수, 이한주, 남경연, 부재분할 및 그룹화에 따른 지오데식돔의 최적대안 평가, 대한건축학회 논문집, 25권, 1호, 2009
13. 이승창, 정우철, 한광희, 오정근, 지능형 트러스 최적화 시스템 개발, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 27권 1호, 2007
14. 석창목, 스페이스 프레임 구조해석을 위한 웹기반 데이터베이스 모델링, 대한건축학회 논문집, 21권, 8호, 2005
15. 이경수, 한상을, 대공간구조물의 형상결정방법에 관한 이론 및 응용, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 18권 1호, 1998
16. 손수덕, 김명선, 김승덕, 강문명, 스페이스 트러스 구조에 대한 최적화 구조 해석 프로그램의 개발, 한국강구조학회지, 1998

▶접수일자 : 2010년 7월 15일  
 ▶심사 완료일자 : 2010년 12월 1일  
 ▶게재 확정일자 : 2010년 12월 2일