

CAGD를 이용한 프리폼 이산화 공간구조물의 유한요소망 자동생성기법

Automatic FE Mesh Generation Technique using Computer Aided Geometric Design for Free-form Discrete Spatial Structures

이 상 진 *
Lee, Sang Jin

요 약

본 연구에서는 프리폼(free form)을 가지는 공간구조물의 유한요소망을 자동으로 생성하는 기법을 개발하고 그 배경이론과 수치실험 결과 그리고 이용방안에 대하여 기술하였다. 본 연구를 통하여 제시한 유한요소망 생성기법은 공간구조물의 해석을 위해 전통적으로 이용하던 형태별 자동생성기법의 한계를 극복하기 위하여 개발 되었다. 개발된 자동 생성기법은 최근 연속체 쉘 구조물의 형태를 정확히 구현하기 위해 활발히 이용되고 있는 CAGD기법을 도입하였다. 본 연구에서 제시된 자동생성기법은 두 단계의 생성과정을 거치는데 첫 번째가 구조물의 형태를 기하학적인 모델로 표현하는 단계이며 두 번째가 표현된 기하학적인 모델에 이산화된 공간구조물을 생성하는 단계이다. 수치실험을 통하여 본 연구에서 개발된 자동생성기법이 임의의 형상을 가지는 이산화된 공간구조물을 표현하기 용이할 뿐만 아니라 기존의 자동생성기법을 수정 이용할 수 있는 장점이 있으며 특히 이산화된 공간구조물의 형상최적화에도 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 나타났다.

Abstract

This paper provides background theories and numerical results of automatic finite element (FE) mesh generation for free-form discrete structures. The present method adopts the computer aided geometric design (CAGD) technique to overcome the limitation of case-sensitive traditional automatic FE mesh generator. The present technique involves two steps. The first one is to represent the shape of the structure using the geometric model based on the CAGD and the second one is to generate the discrete FE mesh of spatial structures over the geometric model. From numerical results, it is found to be that the present technique is very easy to produce the FE mesh for free-form spatial structures and it can also reuse some features of traditional automatic mesh generator in the process. Furthermore, it shows the possibility to be used for the shape optimization of large spatial structures.

키워드 : 쉘, 프리폼 구조, 자동유한요소망 생성기법, 공간구조물, CAGD

Keywords : Shell, Free-form Structure, Automatic FE Mesh Generation Technique, Spatial Structures, CAGD

1. 서 론

최근 프리폼을 가지는 고층건물과 대공간구조물이 빈번히 건설되고 있다.¹⁾ 이러한 프리폼 구조의 출현은 정

형화된 건축물에 익숙해진 현대인들에게 건축물의 형태에 대한 새로운 상상과 가능성을 보여주고 있으며 또한 형태로부터 완전히 자유로운 건축이 가까운 미래에 실현될 수 있다는 기대감을 사회전반에 불러 일으키고 있다. 이러한 점진적인 사회적 인식의 변화는 구조 공학자에게 프리폼 구조에 효과적으로 대응할 수 있는 더 강력한 해석 및 설계 기법에 대한 현실적인 연구를 요구하는 계기

* 경상대학교 공과대학 건축공학과 부교수, Ph.D.
現 University of Cambridge, Visiting Scholar
Tel: 055-751-6541, E-mail : lee@gnu.c.kr

가 되었으며 프리폼 구조물의 설계에 대한 새로운 패러다임을 공학자에게 직접 요구하는 단계로 나아가고 있다.

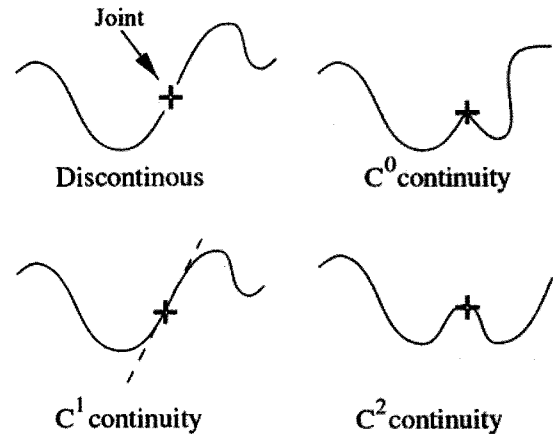
이러한 맥락에서 본 연구는 대공간구조물의 형태 해석 및 설계를 수행하는데 있어 필요한 새로운 개념의 유한요소망 자동생성기법을 제시하고 그 배경이론과 수치실험 결과를 기술하고자 한다.

현재까지 공간구조물의 해석을 위한 유한요소망의 자동생성기법과 관련된 연구는 구조물을 형태학적으로 분류하고 그 분류에 따라 자동생성기를 개발하는 방향으로 이루어져 왔다. 그러나 구조물이 프리폼을 가지게 되면 형태 지향적인 분류에 따른 기존의 자동생성기법으로 해석모형을 형성하고 이용하는 데는 다소 무리가 있다. 특히 설계과정에서 구조물의 형태를 효율적으로 조절하기 위해서는 새로운 개념의 자동생성기법의 개발이 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 최근 연속체 구조물을 형성하는데 활발히 이용되고 있는 CAGD기법^{2,3}을 도입한 이산화 공간구조물의 유한요소망 자동생성법을 제시하고 그 배경이론과 성능 그리고 이용 가능성에 대하여 기술하였다.

2. 기하학적 모델

구조물을 해석하고 설계하는 과정에서 기하학적 모델의 역할은 매우 중요하다. 기하학적인 모델은 구조물의 형태를 정확히 표현하기 위해 필수적이며 일반적으로 수학적 식으로 표현된다. 현재 연속체 구조물의 형태를 표현할 수 있는 기하학적 모델로는 쿤(Coon)의 조각면⁴, 베지에(Bezier) 곡면, B-스플라인(B-spline) 곡면 그리고 NURBS 가 이용되고 있다.⁵ 이러한 기하학적인 모델은 구조물의 형상을 불연속성이 없이 정확히 표현하는데 용이할 뿐만 아니라 대형구조물의 최적설계에 있어서는 설계변수의 수를 크게 감소시키는 역할을 하여 연산시간을 획기적으로 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 공간구조물의 기본형태를 표현하기 위하여 곡면이 C^2 연속성을 만족하고 수학적으로 비교적 단순한 표현식을 가지는 쿤의 조각면을 도입하였다. 참고로 기호 C

는 곡선 또는 곡면의 연속성을 나타내기 위하여 도입되었으며 곡선 또는 곡면의 완만함(smoothness)을 나타낸다. 일반적으로 곡선과 곡면에 틈(gap)이 있으면 “불연속을 가진다”라고 하며 불연속이 존재하지 않을 경우에 연속성을 가지는 것으로 간주한다. 이러한 연속성을 그림으로 도시하면 그림 1과 같다.



〈그림 1〉 연속성의 정의

본 연구에서 도입한 쿤의 조각면은 매개변수 u, v 로 표현되는 스플라인(spline)의 텐서(tensor)곱으로 나타나며 곡면의 x, y, z 좌표 값은 아래의 스칼라함수 $r_p(u, v)$ 을 이용하여 구할 수 있다.

$$r_p(u, v) = \mathbf{u} \mathbf{H} \mathbf{G}_p \mathbf{H}^T \mathbf{v}^T, p = x, y, z \tag{1}$$

여기서,

$$\mathbf{u} = \{u^3, u^2, u, 1\}, \mathbf{v} = \{v^3, v^2, v, 1\}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

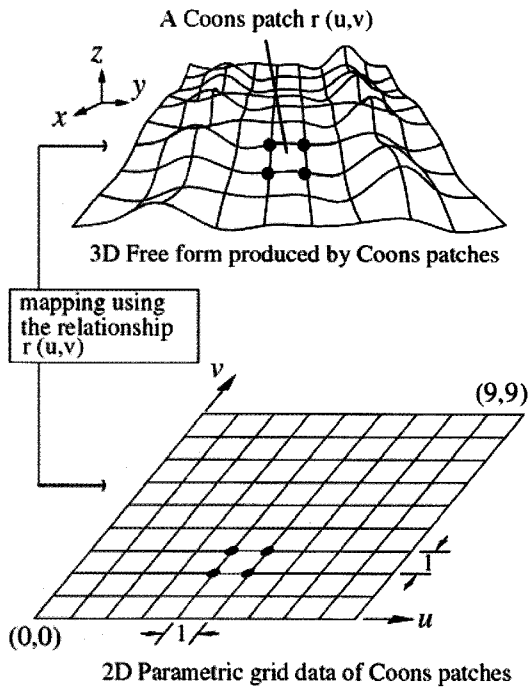
$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} R & R_v \\ R_u & R_{uv} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_p(0,0) & r_p(0,1) \\ r_p(1,0) & r_p(1,1) \end{bmatrix}$$

여기서 $r_p(0,0), r_p(0,1), r_p(1,0), r_p(1,1)$ 은 쿤의 조각면의 네 가장자리에 대한 좌표값을 나타내고 $r_p(0,0)_v$ 는 매개변수 u 에 대하여 $r_p(u, v)$ 를 점(0,0)에서 편미분한 값을 말한다.

리드가 수학적으로 일정한 관계를 가지게 된다. 다시 말하면 2차원 그리드가 3차원 기하학적 모델에 사상될 수 있으며 그 역도 가능하다.

이러한 사상법의 장점은 공간구조물의 형상을 조절하기 위해 유한요소망을 직접 사용하지 않아도 되며 쿤의 조각면에 의해 생성된 곡면이 C^2 의 연속성을 자동적으로 만족하므로 사상을 통하여 구해지는 이산화 구조물은 항상 기하학적인 모델에 준하는 형태를 가지게 된다.



〈그림 3〉 기하학적 모델과 파라메트릭 평면

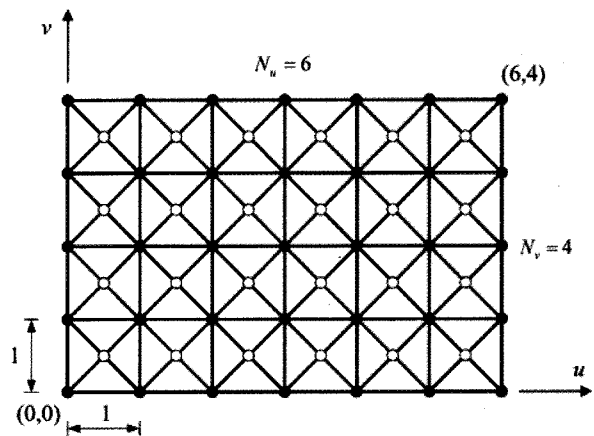
그러나 사상법을 이산화된 공간구조물의 유한요소망을 생성하는데 적용하기 위해서 반드시 필요한 부분이 이산화구조물의 특성과 정의한 기하학적 모델이 연동될 수 있어야 한다는 것이다. 본 연구에서는 기하학적 모델에 사상할 평면 그리드 패턴을 단층과 복층으로 채택하였다. 특히 본 연구에서는 복층의 그리드 패턴을 기하학적 모델과 연동하기 위하여 목표 공간구조물에 가상의 중간면을 도입하였다. 즉 기하학적 모델과 그리드 패턴의 연동을 위해 중간면을 중심으로 상현재와 하현재 그리고 사재를 생성하는 방법을 택하였다.

4. 2차원 평면 그리드 패턴

본 연구에서는 단층 평면 그리드와 복층 평면 그리드 두 가지 기본 패턴을 전절에서 형성한 프리폼의 기하학적 모델에 사상하여 공간구조물의 유한요소망을 형성하였다.

4.1 단층(Single-Layer) 평면 그리드 패턴 생성:

단층 평면 그리드의 기본 형태는 매우 다양하게 나타날 수 있으나 본 연구에서는 정사각형 격자를 가지는 단층 평면 그리드를 이산화 공간구조물을 형성하는데 이용하였다. 본 연구에서 이용한 단층 평면 그리드의 기본 패턴은 그림 4와 같이 정사각형 격자내에 4개의 사재가 포함된 형태의 단위 유니트(unit)를 가지는 평면 그리드이다.



〈그림 4〉 단층 평면 그리드 패턴

그림 4에는 축 방향의 분할간격수 $N_u=6$ 과 u 축방향의 분할간격수 $N_v=4$ 를 가지는 정사각형 평면 그리드를 예로 도시하였다. 이 평면 그리드는 기하학적 모델에 사상하기 위한 기본 유한요소망의 절점수와 부재 연결상태를 나타내며 u, v 좌표계로 표현하였다. 그림 4에 도시된 평면 그리드는 다음과 같은 순서로 형성하였다:

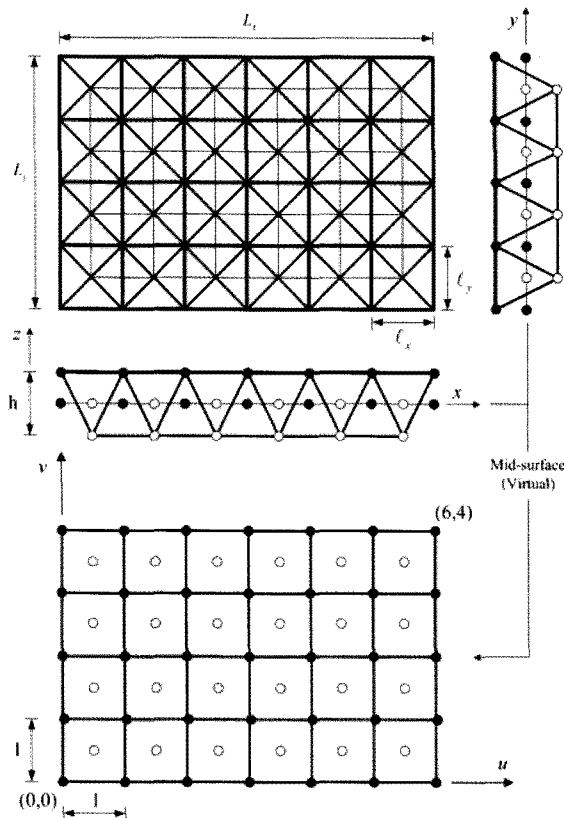
1. 6×4 의 정사각형 그리드를 생성한다. 그리드의 교차점에 절점(\bullet)을 생성한다. 이때 그림 4에 도시된 바와 같이 u 축 방향의 절점은 $n_u=N_u+1$ 개 그리고 v 방향의 절점은 $n_v=N_v+1$ 개가 생성된다.
2. 각 정사각형의 중앙에 위치하는 절점(\circ)을 생성한다. 이때 생성되는 절점의 수는 그림 4에 도시된 바와 같이 N_u+N_v 개다.

3. 생성된 절점을 연결하여 유한요소를 생성한다. 이때 수평부재는 $N_u \times n_w$ 개, 수직부재는 $N_v \times n_h$ 개 그리고 사재는 $4 \times N_u \times N_v$ 개가 생성된다.

4. 평면그리드의 절점좌표 값은 사상을 위해서 기하학적 모델의 $u-v$ 평면의 좌표 값과 동일한 방식으로 작성되어야 한다. 본 연구에서는 그림 4에 도시된 바와 같이 좌측하단을 원점으로 하여 그리드 격자의 절점 좌표 값을 부여 하였다.

4.2 복층(Double-Layer) 평면 그리드 패턴 생성:

본 연구에서 이용한 복층 평면 그리드의 기본 패턴은 그림 5에 도시된 바와 같이 상부층과 하부층을 잇는 사이층에 사재가 존재하고 있으며 사재는 상부의 단위격자 네 가장자리와 그 중심위치 아래에 있는 하부의 단위격자 절점을 서로 연결하고 있다. 전체적으로는 하부의 격자 절점 위에 단위 역 피라미드가 연속적으로 펼쳐져 있는 형태이다.



<그림 5> 복층 평면 그리드 패턴 : 가상의 중아면 도입

본 연구에서는 복층 평면 그리드 패턴을 프리폼에 사상하기 위해서 그림 5에 도시한 가상의 중앙면을 고안하였다. 이 가상의 평면 그리드의 패턴은 복층 평면 그리드의 절점정보를 가상의 중앙면에서 전부 사상하여 표현한 것이다. 본 연구에서 유한요소망의 자동생성을 위해서 가상의 중앙면을 도입하게 된 이유는 기하학적 모델과 복층 평면 그리드 구조의 유한요소망을 연동하기 위한 것이다. 다시 말하면 복층 그리드 패턴을 생성하고 효율적으로 조절하기 위해서 중앙면에 가상의 평면 그리드 패턴을 이용하게 된다.

그림 5에 도시된 복층 평면 그리드의 절점을 가상의 중앙면에 생성하기 위해서는 $u-v$ 평면을 기준으로 하는 좌표계를 이용하게 된다. 이때 구조물의 가로 길이 L_x , 세로 길이 L_y , u 방향의 분할 개수 N_u , v 방향의 분할 개수 N_v 의 값이 필요하다. 이와 관련한 내용은 그림 4를 함께 참조할 수 있다. 따라서 복층 그리드의 상부부재, 하부부재 그리고 대각부재로 연결되는 기본적인 절점 생성을 위해서는 먼저 그림 5에 도시된 가상의 중앙면을 생성하게 된다. 이때 그림 4에 도시된 바와 마찬가지로 중앙면의 격자의 가로는 u 축, 세로는 v 축으로 표현하며 절점생성의 시작은 좌표값(0,0)에 절점번호 1번을 부여하고 왼쪽에서 오른쪽으로, 아래에서 위로 갈수록 절점번호를 증가시켰다.

구조물의 전체 길이와 분할 간격 개수의 관계식으로부터 평판의 가로, 세로 단위부재 길이 l_x 와 l_y 는 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} l_x &= L_x / N_u \\ l_y &= L_y / N_v \end{aligned} \tag{4}$$

이때 각 절점의 물리적 좌표는 u 축과 v 축의 단위부재 길이를 $u-v$ 좌표계에 적용하여 생성하게 되며 이에 따른 좌표 값은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} x_n &= u_n \times l_x \\ y_n &= v_n \times l_y \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 u_n 와 v_n 는 $u-v$ 평면 (i,j) 위치에 있는 절점 n 에서의 좌표 값 $(N_u + 1) \times j + (i + 1)$ 이며 x_n 와 y_n 는 이에 상응하는 실제 구조물의 좌표이다. 이때 복층 그리드 구조의 수직방향 좌표 값 z_n 는 하부평판일 경우 $-h/2$, 상부평판일 경우는 $h/2$ 의 값을 가진다. 따라서 상부판은 중앙면에서 z 축 방향으로 높이 $h/2$ 의 위치에 하부판은 z 축 방향으로 높이 $-h/2$ 의 위치에 생성된다. 따라서 상부판의 절점 좌표는 $(x_n, y_n, h/2)$ 로 생성되며 하부판의 절점들의 좌표는 $(x_k, y_k, -h/2)$ 로 생성된다.

여기서 k 는 $k = n_x \times n_y + (N_u + 1) \times (j - \frac{1}{2}) + (i + \frac{1}{2})$ 이다.

5. 프리폼 공간구조의 생성

본 연구에 제시한 자동생성기법은 제한된 형태의 구조물에 대한 유한요소망을 생성하기 위한 것이 아니라 기하학적 모델로 형성된 프리폼 구조물에 대한 이산화된 유한요소망을 자동생성하는데 초점을 맞추고 있다. 본 연구에서는 프리폼을 표현하기 위해 전술한 바와 같이 쿤의 조각면을 이용하여 기하학적인 모델을 형성하였으며 제 4절에 기술한 평면그리드 정보를 프리폼에 사상하

는 방식으로 유한요소망을 생성하였다. 그림 6은 본 연구에서 제시한 자동생성기법의 순서를 도시한 것이다.

본 연구에서는 프리폼을 가지는 스페이스 프레임의 유한요소망을 생성하기 위해서 단층과 복층의 그리드 패턴을 사용하였으며 아래의 방법을 이용하였다.

5.1 프리폼 단층 스페이스 프레임 생성

단층 스페이스 프레임의 생성은 제 4절에서 기술한 단층 평면 그리드 패턴을 제 2절에서 기술한 기하학적 모델로 형성한 프리폼에 사상하면 간단히 구할 수 있다.

5.2 프리폼 복층 스페이스 프레임 생성

단층의 경우와는 달리 복층 스페이스 프레임의 경우에는 그림 5에 도시된 중층면의 평면그리드 정보를 이용하여 복층 스페이스 프레임 구조의 상층면 절점과 하층면 절점을 생성한다. 이때 복층면의 상층면과 하층면의 절점은 중층면의 절점의 위치와 아래식과 같은 단위 수직 벡터를 이용하여 계산할 수 있다.

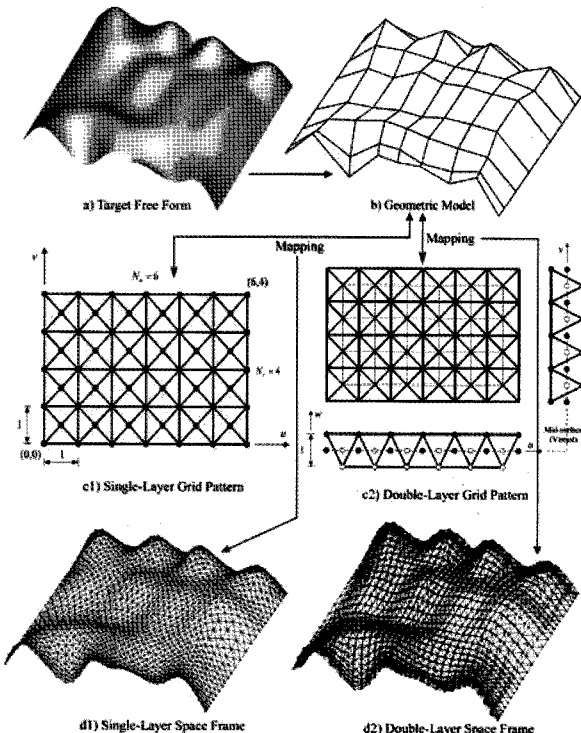
$$\vec{n} = \frac{r(u,v)_{,u} \times r(u,v)_{,v}}{|r(u,v)_{,u} \times r(u,v)_{,v}|} \tag{6}$$

또한 본 연구에서와 같이 사각형의 격자로 형성된 그리드 패턴의 경우 중층면에 전체 절점을 모두 생성한 후에 라그랑지 함수를 이용하여 상층면과 하층면의 절점을 찾을 수도 있다. 이때 복층 스페이스 프레임의 상층면($\xi_3 = 1/2$)과 하층면($\xi_3 = -1/2$)의 좌표값은 아래 식을 이용하여 구할 수 있다.⁶⁾

$$x = \sum_{a=1}^4 N_a \bar{x}_a + \sum_{a=1}^4 N_a \frac{h}{2} \xi_3 V_3 \tag{7}$$

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \sum_{a=1}^4 N_a \begin{Bmatrix} \bar{x}_a \\ \bar{y}_a \\ \bar{z}_a \end{Bmatrix} + \sum_{a=1}^4 N_a \frac{h}{2} \xi_3 \begin{Bmatrix} v_3^x \\ v_3^y \\ v_3^z \end{Bmatrix} \tag{8}$$

여기서 N_a 는 형상함수, $\bar{x}_a, \bar{y}_a, \bar{z}_a$ 는 중층면의 절점좌표, h 는 상층면에서 하층면까지의 높이, ξ_3 는 상층면과



〈그림 6〉 프리폼에 대한 이산화 유한요소망 생성 순서

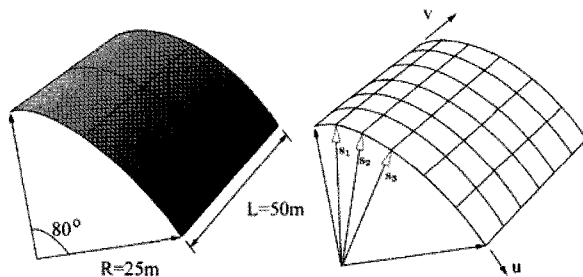
하층면을 나타내는 상수로 $\xi_3 = 1$ 은 상층면, $\xi_3 = -1$ 은 하층면을 나타내며 v_3^x, v_3^y, v_3^z 는 중층면에 수직인 단위벡터 V_3 의 성분을 나타낸다. 참고로 다층의 면을 가지는 스페이스 프레임구조도 ξ_3 값의 조정을 통하여 동일한 방법으로 생성할 수 있다.

6. 수치예제

본 연구에서 제시한 이산화 공간구조물의 유한요소망 자동 생성기법의 성능을 검증하기 위하여 세 가지의 수치예제를 수행하였다. 세가지 수치예제를 통하여 제시된 자동생성기법의 범용성과 생성 곡면의 변화를 조절하는 능력을 조사하고 그 결과를 기술하였다.

6.1 실린더 형상 공간구조

이 예제에서는 공간구조물에 빈번히 이용되고 있는 실린더 형태의 구조에 대한 유한요소망을 본 연구를 통하여 제시한 자동생성기법으로 생성하였다. 그림 7(좌)에 도시된 바와 같이 실린더의 스패는 $L=50m$ 그리고 실린더의 반경은 $R=25m$ 이다. 그리고 그림 7(우)에 도시된 바와 같이 6×6 칸의 조각면을 이용하여 실린더 형태에 대한 기하학적 모델을 형성하였다.



〈그림 7〉 실린더 형상과 콘의 조각면

기하학적 모델에 사상한 기본 그리드패턴은 제 4절의 복층 그리드 패턴을 사용하였다. 이때 그리드 패턴은 $N_u=50, N_v=40$ 로 분할하였다. 그리고 복층 그리드의 높이는 로 하였다. 그림 7에 도시된 초기형상에 대한 기하학적 모델을 이용하여 유한요소망을 생성하고 표 1에 도시하였다. 표 1에 도시된 유한요소망은 2665개의 절점과 10368개의 요소로 공간구조물이 이산화된 것이다. 또한 이 예제에서는 기하학적 모델을 이용한 곡면의 변

화와 이에 대응하는 유한요소망의 조절 성능을 검증하기 위하여 다음의 세 가지 조건을 부여한 뒤 유한요소망을 자동 재생성하였다: 1) $u=1$, 2) $u=2$, 3) $u=3$ 에 위치한 조절점을 반지름(R) 방향으로 각각 $s_1=5m, s_2=5m, s_3=5m$ 만큼씩 이동 한 뒤 조절점의 이동에 따른 실린더 곡면의 변화에 연동한 유한요소망의 자동 재생성 결과를 기술하였다. 자동재생성된 유한요소망의 결과는 표 1의 나머지 행에 각각 도시하였다.

〈표 1〉 실린더 형태의 공간구조의 유한요소망 자동 생성 결과

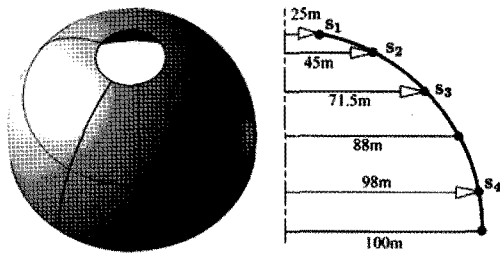
	정면	투시도
초기형상		
s_1		
s_2		
s_3		

수치실험을 통하여 기하학적인 모델에 기초한 자동생성기법은 곡면의 변화에 손쉽게 대응하여 공간구조물의 유한요소망을 매우 효과적으로 재생성할 수 있는 것으로 나타났다.

6.2 돔 형상

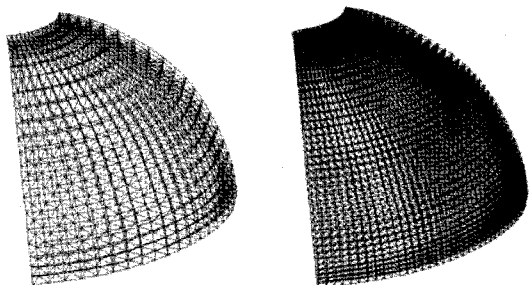
이 예제에서는 돔 형태의 공간구조물에 대한 유한요소

망을 자동생성하였다. 돔 구조물은 축대칭 구조물 이므로 돔의 1/4을 자동생성하였다. 돔 형태의 공간구조를 형성하기 위해서 5×5칸의 조각면을 이용하였다. 구의 반지름은 $R_s=100m$ 이며 그림 8에 도시된 바와 같이 돔의 정점에서 아래로 3.2m부분까지의 상부면을 제거하였다. 기하학적 모델에 사상한 기본 그리드패턴은 제 4절의 복층 그리드패턴을 사용하였다. 그리고 복층 그리드의 높이는 5m로 하였다.



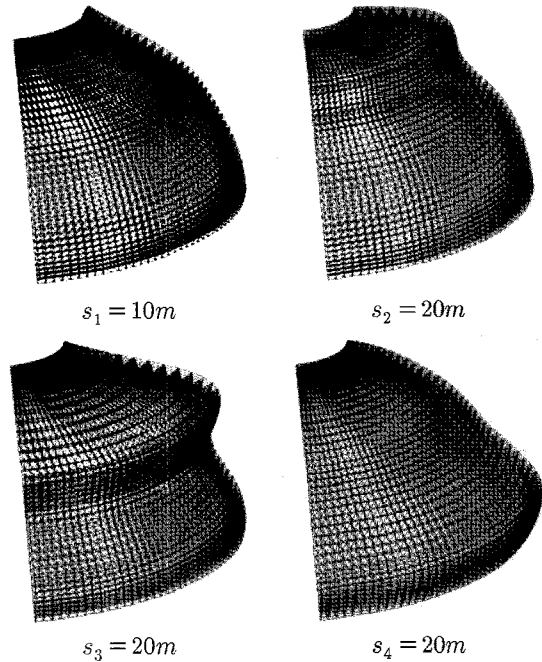
〈그림 8〉 돔 형상과 쿤의 조각면에 대한 조절점 위치

이 예제에서는 $N_u=40, N_v=40$ 과 $N_u=80, N_v=80$ 의 분할 간격수를 가지는 두 가지 그리드 패턴을 이용하였다. 먼저 두 가지 패턴을 이용하여 초기형상에 대한 유한요소망을 생성하고 그 결과를 그림 9(상)에 도시하였다. 그림 9(상)에 도시된 유한요소망은 각각 3281개의 절점과 12800개의 요소를 가지는 모델과 12961개의 절점과 51200개의 요소를 가지는 모델로 생성되었다. 또한 이 예제에서는 돔의 형상조절에 대한 자동생성기법의 성능을 검증하기 위해 일정한 높이에 있는 조절점들이 그 반지름 방향으로 동시에 이동할 때 생기는 형상의 변화에 따른 공간 스페이스 프레임의 유한요소망의 변화를 관찰하고 그 결과를 그림 9(중, 하)에 도시하였다. 이때 조절점의 이동은 그림 8에 도시된 바와 같이 일정한 높이에 있는 조절점들을 연계하여 화살표 방향으로 각각, $s_1=10m, s_2=20m, s_3=30m$ 그리고 $s_4=20m$ 씩 이동하여



초기형상(12800개요소) 초기형상(51200개요소)

돔의 형상을 변형시키고 그 결과를 제시하였다.

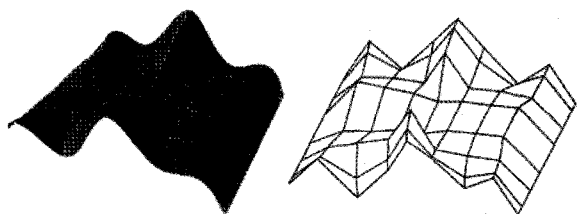


〈그림 9〉 돔 형태 공간구조의 유한요소망 자동 생성 결과

돔의 형태변화에 대한 조절이 기하학적인 모델을 통하여 이루어지고 변화된 기하학적 모델에 연동하여 유한요소망이 효과적으로 재 생성됨을 알 수 있었다. 이 예제를 통하여 공간구조물에 빈번히 이용되고 있는 돔형 구조물의 곡면의 변화에도 본 연구에서 제시한 자동생성기법이 매우 효율적으로 적용될 수 있는 것으로 나타났다.

6.3 프리폼

이 예제에서는 프리폼을 가지는 공간구조물에 대한 유한요소망을 생성하기 위해서 그림 10(좌)에 도시된 형상을 이용하였다. 이 형상은 Rhinoceros[®] 를 이용하여 생성하였으며 생성된 프리폼은 가로 120m와 세로 100m의 그리드패턴을 가진다.



〈그림 10〉 프리폼 투시도 및 쿤의 조각면

프리폼의 유한요소망을 생성하기 위하여 그림 10(우)에 도시된 8×7의 쿤의 조각면으로 표현한 것이다. 이 예에서는 모두 네 가지의 분할간격을 가지는 복층 그리드 패턴을 이용하였다: 1) $N_u=16, N_v=14$ 2) $N_u=32, N_v=28$, 3) $N_u=48, N_v=42$, 4) $N_u=64, N_v=56$. 그리고 복층 그리드의 높이는 $2m$ 로 하였다. 이 네 가지의 복층 그리드 패턴을 그림 10의 프리폼에 사상하여 유한요소망을 생성하고 그 결과를 표 2에 도시하였다.

구조물의 유한요소망을 개발한 자동생성기법을 통하여 손쉽게 생성할 수 있었다. 표 2에 도시된 결과를 자세히 관찰하면 주어진 프리폼 공간구조물을 유한요소모델로 표현하기 위해서는 충분한 절점과 요소가 필요한 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서 제시된 자동생성기법이 적용된 해석 및 설계최적화와 관련한 후속연구가 앞으로 필요한 것으로 나타났다.

7. 결 론

본 연구에서는 기하학적 모델을 바탕으로 하는 이산화 공간구조물의 유한요소망 자동생성기법을 개발하고 그 배경이론과 수치실험결과 그리고 이용방안을 기술하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 세부결론과 향후 이용방안을 도출하였다:

- 본 연구를 통하여 제시한 자동생성기법은 기하학적 모델로 표현된 구조물에 상응하는 공간 스페이스 프레임 유한요소망을 생성하는데 매우 효과적인 것으로 나타났다.
- 본 연구에서 제시한 자동생성기법은 기하학적 모델의 변화에 상응하는 공간구조물의 유한요소망을 재생성하는데 매우 효과적인 것으로 나타났다.
- 형상변화에 따른 유한요소망의 재생성이 효율적으로 나타나 제시된 자동생성기법이 기존에 건설된 공간구조물에 대한 형상최적화를 수행하는데 적용될 수 있을 뿐만 아니라 개념설계 단계에 있는 구조물의 형태에 대한 대안을 제시할 수 있는 필수 요소기술의 하나로 사용될 수 있다.
- 본 연구를 통하여 개발된 자동생성기법과 디자인 프로그램 Rhinoceros와의 연계가 충분히 가능하였으며 이러한 결과로 인해 가까운 미래에 공간구조의 디자인과 해석 그리고 최적설계가 통합된 작업환경에서 이루어질 것으로 판단된다.

〈표 2〉 프리폼 공간구조의 유한요소망 자동 생성 결과

case	유한요소망
$N_u = 16$ $N_v = 14$ node : 479 elem : 1792	
$N_u = 32$ $N_v = 28$ node : 1853 elem : 7168	
$N_u = 48$ $N_v = 42$ node : 4123 elem : 16128	
$N_u = 64$ $N_v = 56$ node : 7289 elem : 28672	

수치실험결과로 부터 상용의 디자인 프로그램 Rhinoceros를 이용하여 생성된 프리폼에 대응하는 공간

-감사의 글-

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 (과제번호: #06 R&D B03)에 의해 수행되었음.

-참고 문헌-

1. 김종수, 이상진, "비정형 구조물의 설계," 대한건축학회지, 52권 4호, pp. 48-54, 2008
2. Lee, S.J. and Hinton, E., "Dangers inherited in shells optimized with linear assumptions," Computers and Structures, Vol. 78, pp. 478-486, 2000
3. 이상진, "스위프 기하학적 모델을 사용한 프리즘 쉘의 최적화," 한국전산구조공학회 논문집, 제13권 제2호, pp.221-230, 2000
4. Coons, S.A., "Surfaces for Computer-Aided Design of Space Figures," Mech. Eng. Dept., MIT, 1964
5. Anand, V.B., "Computer Graphics and Geometric Modelling for Engineers," John Wiley & Sons, New York, 1993
6. Lee, S.J. and Kanok-Nuchulchai, W., "A nine-node assumed strain finite element for large deformation analysis," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 42, pp. 777-798, 1998.
7. Robert McNeel & Associates, "User Manual for Rhinoceros (Ver 4.0) - NURBS modeling for Windows," 2006.

▶접수일자 : 2009년 11월 24일

▶심사 완료일자 : 2010년 6월 3일

▶게재 확정일자 : 2010년 6월 10일