

< 논문 >

셀 구조물의 중간면에 대한 삼각형 셀 요소망의 자동생성

문 연 철* · 양 현 익†

(2006년 9월 5일 접수, 2007년 3월 6일 심사완료)

Automatic Generation of Triangular Shell Element Meshes on Mid-Surface in Shell Structure

Yeon-Cheol Moon and Hyun-Ik Yang

Key Words : Mid Surface(중립면), Mesh Generation(요소망 생성), Shell Element(셀 요소), NURBS(비균일 유리 비스플라인 곡면), Offset(오프셋)

Abstract

The surface of 3D shell structure is created by using NURBS and nodes for generating finite element mesh on the surface are created by using external node offset method. In so doing the shortest distance between nodes on the top and bottom surface is searched and then the coordinates of nodes are determined by calculating the mid point of them in the middle of top and bottom surface. Triangular elements are formed on mid surface, and the average aspect ratio of the generated triangular elements are over 0.9.

1. 서 론

기계설계에 있어서 주요 검증 방법의 하나인 유한요소해석은 최근의 흐름을 볼 때 응용 소프트웨어의 발달에 힘입어 과거 2차원적인 투상에 의한 방법에서 벗어나 실제 모델에 가까운 3차원 공간상에서 수행되어지고 있다. 그러나 가전기기 및 통신 단말기의 외곽형상이나 자동차의 차체 및 범퍼 등을 포함하는 많은 분야에서 설계 해석 및 검증의 신속성 및 효율성에 대한 요구로 인하여 3차원 솔리드 유한 요소를 사용하지 않고 설계물의 중간면에서 곡면 요소로 정의되는 3차원 셀 형태의 요소를 많이 사용한다. 현업에서는 대체로

설계물이 CAD를 통해 형상이 결정되므로 실제 설계 해석자가 유한요소 해석에서 적용해야 하는 형상 자료는 3차원 솔리드 모델인 경우가 대부분이다. 따라서 두께가 얇은 부품들의 중간면을 구하고 이에 대한 셀 형태의 유한 요소망을 생성하는 데는 많은 시간과 노력이 소요되는 문제가 있다. 특히 기존의 방법에서 중간면을 수동적으로 재생성하는 방법은 모델에 따라 어렵고 복잡한 작업이 될 수 있다.⁽²⁾ 본 연구에서는 먼저 곡면의 표현 및 형상 변화를 민감하게 표시할 수 있는 NURBS 곡면을 이용하여 공간상에 곡면을 생성하도록 하였고, 이를 3차원으로 모델링 된 셀 구조물의 표면을 대신하는 것으로 이용하여 기존의 다소 복잡할 수 있는 중간면 생성과정을 없애고, 셀 구조물의 중간면에 자동으로 삼각 유한 요소망을 생성하는 기법을 연구하였다.

* 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부
E-mail : skynet@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5285 FAX : (031)419-3447

* 한양대학교 일반대학원 기계설계학과

2. 곡면의 생성 및 표현

2.1 NURBS 곡면⁽⁴⁾

NURBS 곡면은 기저함수의 성질에 의해 충분한 연속성 보장, 국부 변형의 가능성, 곡면 제어의 편의성 등 많은 장점을 가지고 있어 오늘날 CAD 시스템에서 중요한 위치를 차지하고 있다.

다항 곡면은 조정점에 가중치를 추가함으로써 유리곡면(rational surface)으로 확장할 수 있는데 이는 유리(rational)식으로 표현된 기저함수의 사용으로 평면, 구면, 원추 곡면 등과 같은 해석곡면과 각종 자유 곡면을 모두 표현할 수 있으므로 가장 일반적인 형태의 곡면이라고 할 수 있다.⁽²⁾ 따라서 B-spline 곡면을 매듭 벡터(knot vector)가 비균일(non-uniform)한 유리 B-spline 곡면으로 일반화시켜 다양한 형상의 곡면에 적용할 수 있다. 식 (1)은 B-spline 곡면을 유리화된 B-spline 곡면(rational B-spline surface)으로 변환하는 식이다.

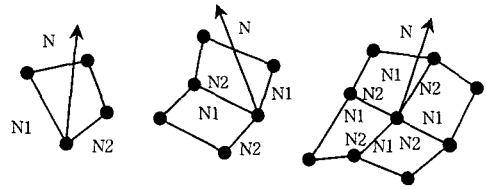


Fig. 1 Definition of normal vector on surface

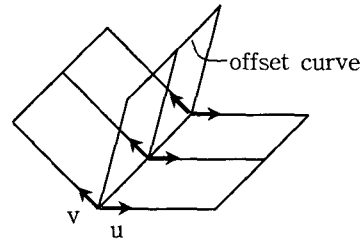


Fig. 2 Definition of intersection curve between offset surfaces

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) w_{ij} P_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,k}(u) M_{j,l}(v) w_{ij}} \quad (1)$$

$$\vec{S}_n = \frac{\sum_{k=1}^m \vec{AN}_k \times \vec{AN}_{k+1}}{\| \sum_{k=1}^m \vec{AN}_k \times \vec{AN}_{k+1} \|} \quad (2)$$

여기서,

$S(u,v)$: point on surface

$N_{i,k}(u)$: i^{th} B-spline basis function

$M_{j,l}(v)$: j^{th} B-spline basis function

$w_{i,j}$: weight

$P_{i,j}$: control points $((n+1) \times (m+1))$

단, A는 오프셋 거리이고, m은 인접 조정점의 수이며, k가 m일 때는 k+1은 1이다.

2.2 NURBS 곡면의 오프셋

2.2.1 곡면의 오프셋

NURBS 곡면 생성법을 이용해 3차원 셀 구조물을 표현하기 위해 상위(외부) 곡면을 생성하고 이에 대응하는 하위(내부) 곡면을 생성하기 위해 곡면의 조정점(Control points)을 오프셋하는 방법을 사용하였다. 조정점의 수직 벡터는 Fig. 1에서와 같이 그 조정점을 공유하는 인접점의 평균 수직방향으로 구하였다. 즉, 하나의 조정점은 이를 공유하는 인접 조정점과 두 개의 경계 벡터를 구성하여 식 (2)에서와 같이 이 경계 벡터끼리의 외적(cross product)의 합으로써 얻어진다.⁽⁵⁾

2.2.2 곡면의 교차 곡선 계산

조정점의 수직벡터를 이용하여 두께 t만큼 곡면을 오프셋 시켰다. 오프셋 된 곡면은 이웃 곡면과의 교차가 발생하게 된다. 본 연구에서는 오프셋에서와 마찬가지로 조정점(control points)을 이용한 근사방법을 이용하였다.

Fig. 2에서와 같이 상위 곡면이 이웃 곡면과 접하는 곳에서 접선벡터의 방향을 교차곡선 조정점의 오프셋 방향으로 정하였다. 오프셋 거리는 두 벡터 사이의 각에 따라 계산하여 오프셋 된 두 곡면의 교차 곡선을 구성하는 조정점을 구하였고 이 교차 곡선을 오프셋 된 곡면의 새로운 경계 곡선으로 하여 하위 곡면을 완성한다.

3. 초기 절점 생성법⁽⁶⁾

3.1 기본 형상의 입력

기본 형상의 입력은 아래 Fig. 3과 같이 외부

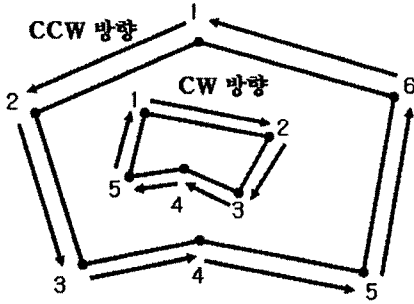


Fig. 3 Input data of initial boundaries

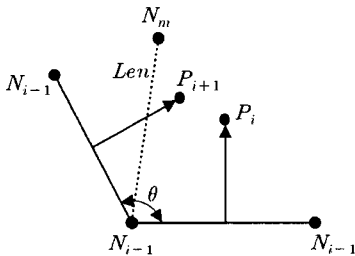


Fig. 4 Definition of nodes

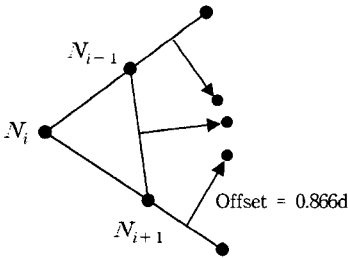


Fig. 5 Node offsetting

경계일 때는 반시계 방향으로, 내부 경계일 때는 시계 방향으로 모서리를 정해준다.

3.2 초기 경계선 상의 절점 생성법

절점을 생성할 때 경계선 상의 절점을 오프셋하여 내부 절점을 생성해 나가기 때문에 먼저 입력받은 형상의 경계선을 요소의 크기로 분할하여 절점을 생성시켜야 한다. 하지만 형상을 이루고 있는 경계선의 길이가 요소의 크기에 맞게 정수로 나누어지지 않으므로 각 경계선마다 분할크기를 구하고 여기서 구한 분할크기로 경계선 길이를 나누어 초기 경계선 상에 절점을 생성시킨다.

4. 영역 내의 절점 생성⁽⁷⁾

4.1 절점의 분류

Fig. 4는 내부 절점을 생성할 때 기준이 되는 세 절점 N_{i-1} , N_i , N_{i+1} 과 이 기준 절점을 제외한 절점들 중 절점 오프셋에 영향을 미치는 절점 N_m 을 결정하여 적절한 위치의 새로운 절점을 생성시키는데 필요한 첨자들을 정의하고 있다.

N_{i-1} , N_i , N_{i+1} : 시작, 중심, 끝 절점

θ : 3개의 기준 절점이 이루는 내부 각도

N_m : 3절점 상에서 중심 절점으로부터 거리가 요소 길이의 2.3배보다 작고 내부 각도 안에 있는 가장 가까운 기존 절점

P_i , P_{i+1} : 내부에 새로이 생길 수 있는 절점

Len : 3절점 중 중심점과 N_m 사이의 길이

d : 요소의 길이

여기서 N_m 의 결정을 위해 정한 2.3배의 값은 각 요소 길이를 비교하여 요소의 이저리짐을 최소화하기 위한 실험값에서 결정되었다.

4.2 내부 절점의 오프셋

기본적으로 내부 절점은 Fig. 5와 같이 각 절점의 중심점에서 일정 거리만큼을 오프셋시켜 생성시키게 된다. 여기서 오프셋 거리는 생성된 절점에 의해 정삼각형에 가까운 형상이 생성될 수 있도록 다음과 같이 정의한다.

$$\tan 60^\circ = \frac{\text{오프셋 거리}}{\frac{d}{2}} \quad (3)$$

$$\therefore \text{오프셋 거리} = 0.866d$$

4.2.1 꼭지점에서의 삼각 요소 생성 방법

삼각 요소를 생성할 때 꼭지점 부근에서는 절점을 오프셋 시키는 것보다는 꼭지점을 그대로 포함하는 요소가 되도록 절점을 생성시키는 것이 좋다. 본 논문에서는 꼭지점 각도 θ 가 95° 이내이면 그 부분은 새로운 경계가 있는 것처럼 처리하도록 하였다. 예를 들어 꼭지점이 N_i 이고 꼭지점 양쪽으로 95° 의 각도를 이루는 절점 N_{i-1} , N_{i+1} 이 있을 때 삼각 요소의 단변과 장변의 비인 형상비(Aspect Ratio)가 약 0.68이 됨을 알 수 있다. 일반적으로 형상비가 0.7 정

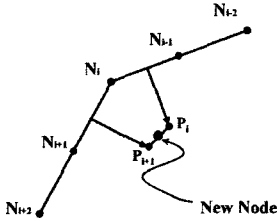
도이면 어느 정도 균형적인 요소라고 할 수 있으므로 95°를 기준으로 삼아도 타당함을 알 수 있다.

4.2.2부터 4.2.8까지는 절점의 추가 및 제거를 통해 삼각 요소를 결정하는 절점들을 선택하는 경우들이다. (Fig. 6, ... ,Fig. 12)

4.2.2 두 절점 사이의 거리가 0.7d 미만인 경우

Fig. 6과 같이 오프셋 된 절점 사이의 거리가 0.7d 이하인 경우 두 절점 P_i 와 P_{i+1} 사이의 중심점을 새로운 절점으로 추가하고 기존 2개의 절점은 제거한다.

$$New\ Node(x) = \frac{P_{i+1}(x) - P_i(x)}{2} \quad (4)$$



$$New\ Node(y) = \frac{P_{i+1}(y) - P_i(y)}{2}$$

Fig. 6 First case of inner node generation

4.2.3 세 절점 사이의 거리가 1.3d 미만인 경우

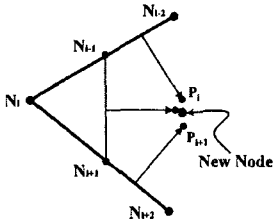


Fig. 7 Second case of inner node generation

4.2.4 1개의 절점이 추가되는 경우 ($\theta < 300^\circ$)

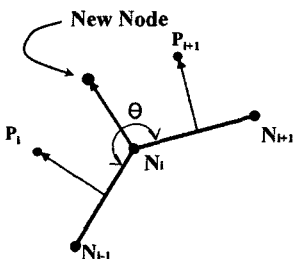


Fig. 8 Third case of inner node generation

4.2.5 2개의 절점이 추가되는 경우 ($\theta \geq 300^\circ$)

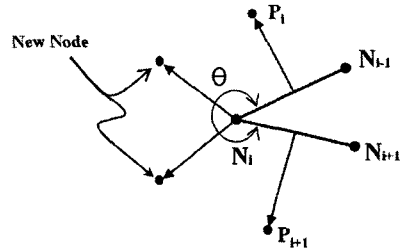


Fig. 9 Fourth case of inner node generation

4.2.6 $\theta < 300^\circ$ 이고 $Len < 1.2d$ 인 경우

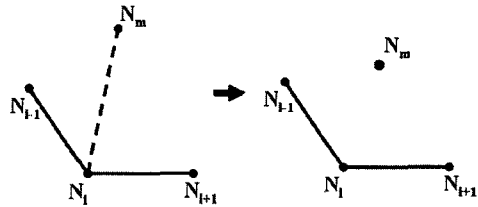


Fig. 10 Boundary node propagation

4.2.7 $\theta < 300^\circ$ 이고 $Len > 1.2d$ 인 경우

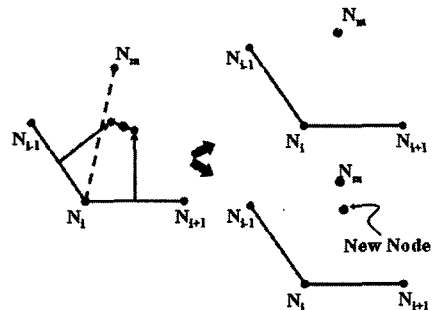


Fig. 11 Two possible cases of node generation

4.2.8 $\theta \geq 300^\circ$ 이고 $Len > 1.2d$ 인 경우

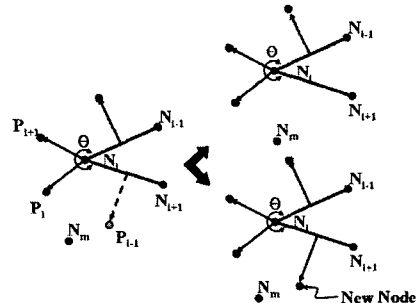


Fig. 12 Two possible cases of node generation

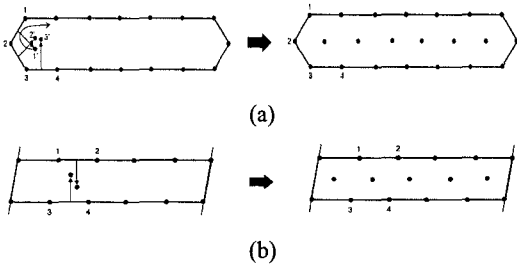


Fig. 13 Completion cases of node generation

상기 과정들을 다시 요약하면 Aspect(1)을 $\triangle(N_i P_i N_m)$ 와 $\triangle(N_{i-1} N_m N_i)$ 의 형상비 중 작은 값이라고 하고 Aspect(2)를 $\triangle(N_{i-1} N_i P_i)$ 의 형상비라고 할 때, 절점 생성 과정을 알고리즘으로 표현하면 다음과 같다.

If (Aspect(1) > 0.7 of Aspect(2) > 0.7) then
 절점 P_{i-1} 제거
 Else
 절점 P_{i-1} 추가
 End if

4.3 절점 생성의 증명⁽³⁾

외부 경계 절점을 오프셋하여 새로운 절점을 생성하고 거리 검사, 교차검사를 통해서 다시 절점의 위치가 조정되어진 후, 조정되어진 절점이 반시계방향이나 아닌 시계방향으로 형성되어지는 경우와 오프셋 된 절점의 X 또는 Y 좌표값의 차가 음수일 때, 즉 두 절점이 교차하게 되면 다음 Fig. 13의 (a) 또는 (b)와 같이 절점 생성을 종결한다.

5. 곡면에서의 유한 요소망 생성

3차원 곡면에서의 유한 요소망 생성은 3단계로 이루어진다. 우선 주어진 곡면을 2차원 평면으로 변환시키고 이어서 변환된 2차원 평면에 요소망을 생성한다. 마지막으로 이를 원래의 3차원 곡면 상으로 다시 변환시켜 유한 요소망을 얻는다.⁽¹²⁾

Fig. 14는 사상법을 이용한 곡면에 유한 요소망을 생성하는 과정에 대한 요약이다.

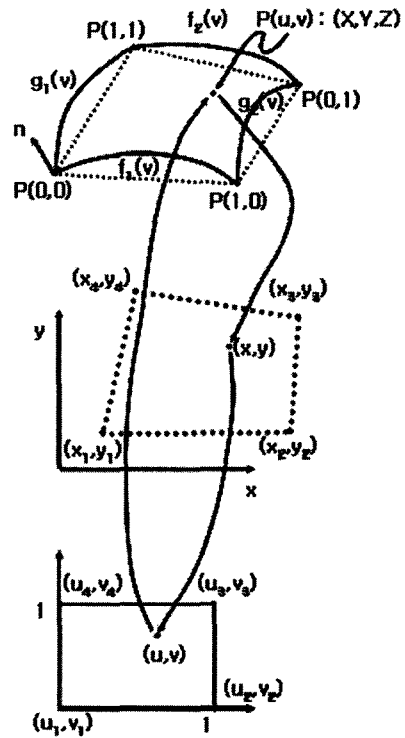


Fig. 14 Mesh generation on surface⁽⁸⁾

$$\begin{aligned}
 x(u,v) &= (1-u)(1-v)x_1 + u(1-v)x_2 + uvx_3 \\
 &\quad + (1-u)vx_4 \\
 &= x_1 + (x_2 - x_1)u + (x_4 - x_1)v \\
 &\quad + (x_1 - x_2 + x_3 - x_4)uv \\
 y(u,v) &= (1-u)(1-v)y_1 + u(1-v)y_2 + uv y_3 \\
 &\quad + (1-u)vy_4 \\
 &= y_1 + (y_2 - y_1)u + (y_4 - y_1)v \\
 &\quad + (y_1 - y_2 + y_3 - y_4)uv
 \end{aligned} \tag{5}$$

투영 평면에 생성된 요소망을 곡면으로 변환시키기 위해서는 투영 평면에 생성된 절점좌표 (x, y)로부터 그에 해당하는 매개변수 (u, v)값을 구해야 하며 이는 식 (5)의 연립 방정식을 풀어 얻을 수 있다.

$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ 는 곡면의 네 꼭지점의 투영 좌표이다. 이와 같이 얻은 매개변수 (u, v)값을 사용하여 투영 평면에서 생성된 모든 절점은 아래 식 (6)에 의해 3차원 곡면으로 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(u,v) = & (1-v)f_1(u) + vf_2(u) + (1-u)g_1(v) \\
 & + ug_2(v) - (1-u)(1-v)P(0,0) \\
 & - u(1-v)P(1,0) - (1-u)vP(0,1) \\
 & - uvP(1,1)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

곡면상의 점들이 투영평면에서의 사각형 영역 밖에 투영될 수가 있는데, 이런 문제는 투영된 경계 곡선상의 절점들의 매개변수 값을 구한 후 구해진 값이 $0 \leq u, v \leq 1$ 영역 이외의 값일 때 이들을 모두 0 또는 1로 바꿈으로써 해결할 수 있다.⁽⁹⁾

6. 중간점 계산

중간면을 결정하기 위해 상위 곡면에 투영된 경계 곡선의 절점을 기준점으로 하여 하위 곡면의 경계 곡선 절점들과 최단 거리의 조합을 찾아 그 중간점을 취하여 중간면에 대한 경계곡선으로 한다. 이 때, 상위 경계 곡선 상의 절점들은 최소한 하나 이상의 조합을 만들지만 하위 경계 곡선 상의 절점들은 조건에 의해 조합을 만들지 못하는 경우가 있다. 조합을 만들지 못한 하위 경계 곡선의 절점들을 기준점으로 하여 상위 곡면과의 최단 거리 조합을 찾아 중간점으로 취하도록 하였다(Fig. 15).

경계 곡선에서와 마찬가지로 상위 곡면 상의 절점을 기준점으로 하여 하위 곡면 상의 절점들과 최단 거리의 조합을 이루는 절점을 찾아 그 중간점을 취하여 중간면상의 절점으로 한다.

상위 곡면의 하나의 절점이 하위 곡면의 두 개의 절점과 조합을 이루거나 상위 곡면의 두 개의 절점이 하위 곡면의 하나의 절점과 조합을 이루는 경우, 각 조합에서 중간점을 취하고 그 중간점끼리의 거리 검사를 통해 $Len < 0.6d$ 이면 그 두 절점을 삭제하고 두 절점의 중간점을 새로운 중간면에 대한 절점으로 한다. $0.6d$ 의 선정은 본 연구에서 삼각 요소의 형상비에 대한 최소 기준

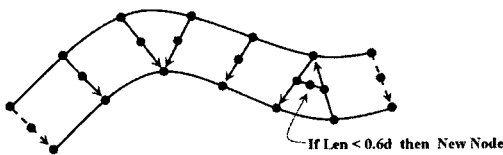


Fig. 15 Mid-Node calculation of nodes on the boundary surface

으로 실험을 통하여 결정 하였다. 새 절점의 좌표는 다음 식 (7)에 의해 구할 수 있다.

$$New\ Node(x) = \frac{P_{i+1}(x) - P_i(x)}{2}
 \tag{7}$$

$$New\ Node(y) = \frac{P_{i+1}(y) - P_i(y)}{2}$$

$$New\ Node(z) = \frac{P_{i+1}(z) - P_i(z)}{2}$$

7. 삼각화 알고리즘⁽⁶⁾

7.1 수정된 Delaunay-Watson의 삼각화 알고리즘

본 연구에서는 등변형에 최대한 가깝게 하기 위한 삼각형 요소망을 생성하기 위하여 수정된 Delaunay -Watson의 요소 생성 알고리즘을 사용하였다. 2차원의 경우, Delaunay -Watson의 요소 생성 알고리즘의 기본 개념은 물체의 내부에 생성된 절점들 중 일직선상에 있지 않은 세 개의 점으로 구성된 삼각형에서 그 삼각형을 이루는 절점들로 이루어진 외접원 내에 다른 절점이 포함되어 있지 않으면 그 세 점은 Delaunay 삼각형의 조건을 만족하여 요소를 생성하는 방법을 말한다(Fig. 16).

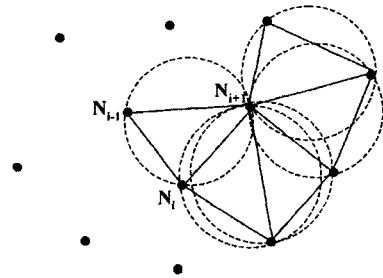
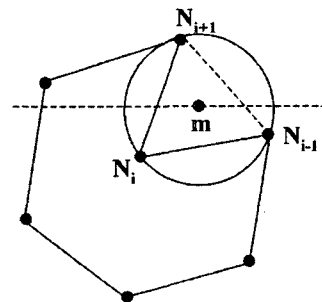


Fig. 16 Delaunay-Watson's triangulation algorithm



m : Center of triangle

Fig. 17 Checking the center point of a triangle

Delaunay-Watson의 요소 생성 알고리즘은 주어진 점의 집합으로 형성할 수 있는 삼각형의 집합 중 가장 등변형에 가까운 삼각형 집합을 생성하는 장점이 있다. 따라서 등변형의 형상이 바람직한 유한 요소를 생성하기 위해 널리 사용되는 방법이다.

그러나 Delaunay-Watson⁽¹¹⁾의 요소 생성 알고리즘은 물체의 경계가 오목한 경우 경계의 외부에 요소를 생성하게 된다. 이는 요소망을 이루는 절점들의 삼각형 중점이 경계의 내부, 외부에 있는지를 판단하여 개선되었다. 여기서, 삼각형 중점의 경계 내부, 외부 판단은 요소망을 이루는 삼각형의 중점을 포함하고 X축과 평행한 임의의 가상 선을 그어 교차를 판단하였다.

두 번째 단점으로 삼각 요소망 생성에 비효율적으로 긴 시간이 소모된다는 것이다. 그 이유는 요소 생성 시 물체의 내부에 생성된 모든 절점들을 개별적으로 비교하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 이 문제점을 해결하기 위하여 다음과 같은 방법으로 개선하였다. 절점들은 초기 설정 요소 길이의 일정 범위 안에 들도록 절점 생성 단계에서 이미 생성되었으므로 삼각형 요소를 이루는 점들은 각각의 절점들 간의 거리가 초기 설정 요소 길이에서 많이 벗어날 수 없다. 그러므로 요소 생성 시 물체의 내부에 생성된 모든 절점들을 비교하지 않고 임의의 절점을 중심으로 초기 설정 요소 길이의 일정 범위 안에 있는 절점들만을 저장해 두었다가 거리 비교를 수행토록 하여 요소 생성 소요 시 계산 횟수를 줄였다(Fig. 17). 예를 들어 임의의 절점을 중심으로 가장 좋은 형상인 정삼각형 요소를 이룰 수 있는 절점이 6개가 존재하는 경우, 생성된 모든 절점을 비교하지 않고 임의의 절점 주위의 6개만을 비교하면서 요소를 생성하면 삼각 요소 생성 시 계산 횟수가 현저히 감소된다. 이에 대한 Delaunay-Watson의 삼각화 알고리즘과의 계산 횟수의 비교는 Table 1과 같다.

수정된 알고리즘을 이용하여 삼각 요소를 생성하는 방법은 다음과 같다. 먼저, 경우 물체의 내부에 생성되어진 임의의 절점을 하나 택하고 그

절점을 제외한 절점들을 비교해 초기 설정 요소 길이의 일정 범위 안에 존재하는 절점들을 찾아 저장한다. 저장되어진 절점들 중에서 다시 임의의 하나를 택하고 그 점을 제외한 나머지 두 개의 절점을 택하여 외접원을 구성한 다음, 그 외접원에 주위 절점들의 존재 여부를 판단하여 요소를 생성한다.

8. 자동 요소망 생성 프로그램

8.1 프로그램의 구성 및 실행 과정

8.1.1 프로그램의 구성

1. NURBS surfaces 생성을 위한 data 입력
2. 각 곡면의 생성 및 offset
3. 각 곡면의 매개 평면 생성 및 임의 형상의 홀 입력
4. 각 곡면의 매개 평면에 절점 생성
5. 각 곡면에 절점 사상(projection mapping)
6. 상/하위 곡면상의 절점간의 최단 거리 탐색 및 중간점 계산
7. 중간점을 이용한 삼각 요소망 생성
8. 요소의 형상비(aspect ratio) 정보의 출력

8.2 프로그램의 순서도

Fig. 18는 본 연구에서 개발된 프로그램에 대한 순서도(Flowchart)를 보여주고 있다.

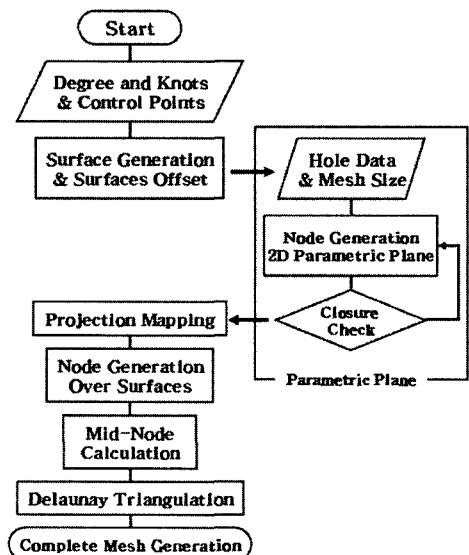


Fig. 18 Flowchart of the program

Table 1 Comparison of time complexity (n : No. of nodes)

	Delaunay-Watson	Modified
No. of iteration	$n \times (n-1) \times (n-2) \times n$	$n \times (n-1) \times 6 \times 5 \times 6$

9. 적용 예

9.2 원통형 예제

개발된 프로그램의 효율성을 보여주기 위해 임의형상(9.1절, Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21) 및 원통형상(9.2절, Fig. 22)에 대한 요소망 생성을 하였다. 각 예의 형상비를 통해 알 수 있듯이 0.9 이상의 우수한 형질의 요소망이 생성됨을 알 수 있다.

9.1 임의의 형상

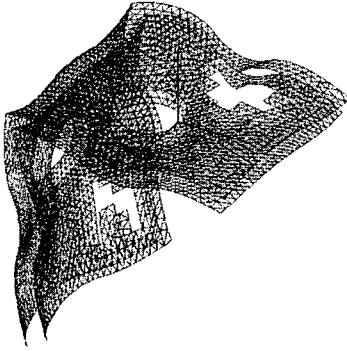


Fig. 19 Mesh generation on the NURBS surfaces

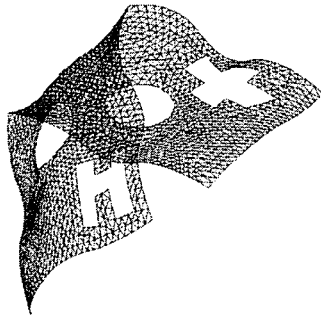


Fig. 20 Completed mesh generation on the mid-surfaces

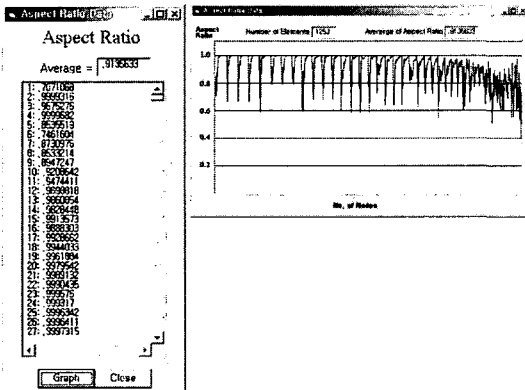
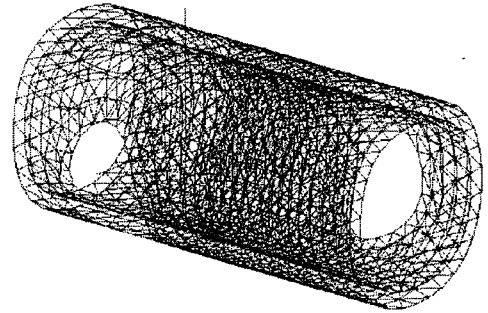
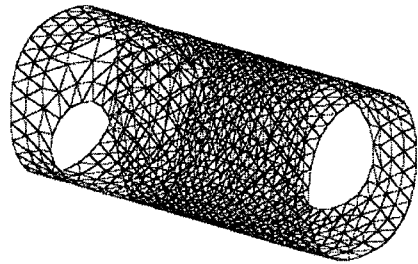


Fig. 21 Aspect ratio of the elements



(a) Mesh generation on the NURBS surfaces



(b) Completed mesh generation on the mid-surfaces

Fig. 22 An Example of shell element meshes on mid-surface

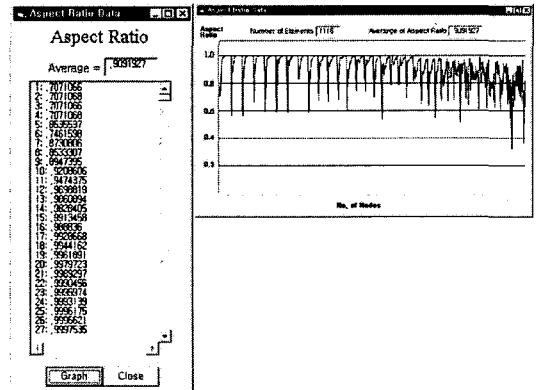


Fig. 23 Aspect ratio of the elements

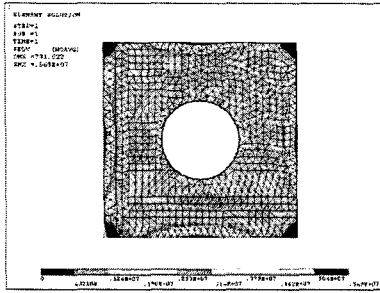


Fig. 24 An example of analysis of AMG FE model(element : 1466)

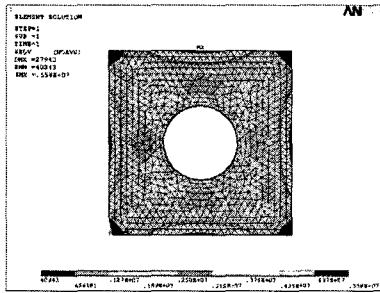


Fig. 25 An example of analysis of ANSYS FE model(element : 1440)

Table 2 Comparison of stress analysis result

	Element number	Max. von-Mises stress
AMG	1466	5.69 MPa
ANSYS	1440	5.58 MPa

9.3 응력 해석 비교

Fig. 24 ~Fig. 25에서 보여지듯이 간단한 모델을 본 연구에 의해 생성한 요소망(AMG)과 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS를 통해 생성한 요소망의 응력 해석 결과를 비교하였을 때 비슷한 요소 갯수에서 Von mises stress의 오차는 약2%로 나타났고 이를 통해 AMG에 의해 생성된 요소망의 효용성을 확인할 수 있다.

10. 결 론

본 연구에서는 곡선 및 곡면을 표현하는데 매우 우수한 NURBS 공식을 이용하여 설계자가

구멍을 포함한 임의의 형상에 대하여 다양한 곡면을 직접 설계할 수 있도록 한 후에 3차원 셀 구조물의 중간면을 구하는 과정을 없애고 상/하위 표면의 절점으로부터 중간면에 유한 요소망을 자동 생성하도록 하였다. 이는 한 쌍의 상/하위 곡면 상의 절점들의 최단거리 조합을 찾아 중간점을 탐색하여 중간면상의 절점으로 하고, 이를 수정된 Delaunay-Watson의 삼각화 알고리즘을 이용하여 삼각 유한 요소망을 생성하도록 한 것이다. 기존의 연구에서는 3차원 구조물의 두께에 의해 요소의 크기가 정해지고, 그 크기가 매우 작다는 단점을 가지고 있었지만, 본 연구에서는 상/하위 곡면에 요소망 생성시 사용자가 요소의 크기를 입력할 수 있도록 하여 필요에 맞는 크기로 요소를 생성할 수 있도록 하였다.

향후에 곡면의 오프셋에 의한 근사 모델이 아니라 3차원 CAD로부터 구조물의 표면 정보를 입력받아 본 논문의 중간면에 대한 삼각형 셀 요소망 생성 기법을 활용하는 연구가 이루어진다면 보다 복잡한 형상의 모델의 경우에도 중간면에 대한 셀 요소망 생성에 많은 도움이 될 것으로 사료된다. 그리고 곡면에서 요소의 유연화에 대한 연구가 이루어진다면 응력집중부와 같은 해석 목적에 맞는 유한 요소를 생성하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Ho-Le, K., 1998, "Finite Element Mesh Generation Method : A Review and Classification," *Computer Aided Design*, 20, 27~38.
- (2) Son, J. H. and Chae, S. W., 2004, "Automatic Generation of Finite Element Meshes on Midsurfaces in Shell Structures," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 28, No. 10, 1517~1525.
- (3) Kim, D. H. and Yang, H. I., 2003, "Automatic Quadrilateral Element Mesh Generation Using Boundary Normal Offsetting In Various Two Dimensional Objects," *Korean Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 8, No. 4, 270~277.
- (4) Farin and Gerald, 1993, "Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design - A Practical Guide," 3rd Edition, Academic Press.
- (5) Suh, E. K., Shim, H. B. and Kim, K. H., 1999,

- "A contact Treatment Algorithm for the Trimmed NURBS Surface and Its Application to Analyses of Deep Drawing Processes," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 23, No. 10, 1750~1757.
- (6) Cheon, J. H. and Yang, H. I., 2000, "Triangular Mesh Generation Algorithm for Generating Nodes and Triangular Elements Concurrently," *Korean Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 5, No. 3, 207~214.
- (7) Kim, K. H. and Yang, H. I., 2004, "Automatic Triangular Mesh Generation over B-Spline Surface Including Arbitrary Holes," *Korean Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 9, No. 1, 1~10.
- (8) Kim, H. I. and Chae, S. W., 1998, "Automatic Generation of Quadrilateral Elements on Sculptured Surfaces with Holes," *Proceedings of KSME Autumn Annual Meeting, A*, 1029~1034.
- (9) Carvendish, J. C., "Automatic Triangulation of Arbitrary Planar Domains for the Finite Element Method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 9, 679~1974
- (10) Chae, S. W. and Jeong, J. H., 1997, "Unstructured Surface Meshing Using Operators," *Proceedings of the 6th International Meshgen Roundtable*, 281~291.
- (11) Kim, B. O. and Yang, H. I., 2000, "The Development of The Automatic Triangular Mesh Generation Software by Improving Lo's Algorithm," *Korean Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 5, No. 1, 95~101.
- (12) Piegl, L. and Tiller, W., 1995, "The NURBS Book," Springer, Germany.