

3차원 물체 표면상의 비정렬 사변형 격자의 자동 생성 기법

원정희¹, 김병수^{*2}AUTOMATED QUADRILATERAL SURFACE MESH GENERATION
ON THREE-DIMENSIONAL SURFACES

J.H. Won and B.S. Kim

Mesh generation for the region of interest is prerequisite for numerical analysis of governing partial differential equations describing phenomena with proper physic. Mesh generation is, however, usually considered as a major obstacle for a routine application of numerical approaches in Engineering applications. Therefore automatic mesh generation is highly pursued.

In this paper automated quadrilateral surface mesh generation is proposed. According to the present method, Cartesian cells of proper resolution for a region bounding the whole region of interest are first generated and the interior cells are identified. Then projecting their surface meshes onto the boundary surfaces gives surface mesh consisting of quadrilateral cells. This method has been implemented as an application program, and example cases are given.

Key Words: Hexahedral Mesh, Automated Surface Mesh Generation, Grid-Based Algorithm

1. 서 론

전산유체역학을 포함하여 복잡한 물리현상에 대한 지배방정식인 편미분 방정식의 해를 컴퓨터 연산을 이용하여 구하는 수치적 접근법의 발전은 다양한 공학 분야에서 활발히 활용되고 있고 그 활용도가 점점 커지고 있다. 이러한 수치적 접근법들은 크게 유한 차분법, 유한 체적법, 그리고 유한 요소법 등으로 분류할 수 있다. 각 수치적 접근법들은 물리 현상에 대한 지배방정식인 편미분 방정식의 이산화 및 근사화 과정에서 서로 다른 수학적 전개 과정을 거치게 된다. 그러나 각 수치 기법들은 최종적으로는 연립된 대수 방정식들을 풀게 되고, 이 과정에서 해석 대상인 공간, 즉 유동 해석의 경우는 고체 표면과 적절히 선택된 외부 경계에 의하여 둘러싸인 유동장, 그리고 구조 해석의 경우는 해석 대상인 물체의 표면을 포함한 물체 내부 공간을 작은 셀이나 요소로 나누어 주어야 한다. 이러한 공간의 이산화가 수치 기법에 의한 편미

분 방정식의 해의 정확도나 수렴성 등에 큰 영향을 미친다는 것은 잘 알려진 사실이고, 일반적으로 격자 생성 작업이라고 불리는 이 작업은 엔지니어링 사이클에서 수치 기법에 의한 공학 해석의 원활한 적용에 종종 장애로 작용한다.

일반적으로 사용되는 격자계는 크게 정렬 격자계와 비정렬 격자계로 구분할 수 있는데, 정렬 격자계는 각 격자점들이 주변 격자점들과 규칙적인 연결 관계를 갖는데 비해 비정렬 격자계는 그러한 규칙성이 없다. 정렬 격자계의 경우 격자점의 규칙성으로 인하여 복잡한 공간이나 물체에 대한 격자 생성이 어려운 경우가 종종 있는 반면에, 비정렬 격자계는 보통 삼각형(2차원)이나 사면체(3차원) 형태의 셀을 이용하여 복잡한 공간에 대해서도 유연하게 격자 생성이 가능하여 격자 생성의 자동화가 상대적으로 용이하다. 그러나, 유동장의 해석이나 구조 해석에 있어서 셀의 형태가 가능하면 찌그러짐이나 왜곡이 없어야 수치계산의 결과도 정확도가 높아진다고 알려져 있고, 그러한 관점에서 사각형(2차원)이나 육면체(3차원) 격자계가 삼각형 등을 이용하는 비정렬 격자계에 비해 포기하기 어려운 장점이 있다. 이와 관련하여 Blacker가 자신의 논문에서 지적인 사항을 인용하면 다음과 같다[1].

1 학생회원, 충남대학교 대학원 항공우주공학과

2 중신회원, 충남대학교 항공우주공학과

* Corresponding author E-mail: kbskbs@cnu.ac.kr

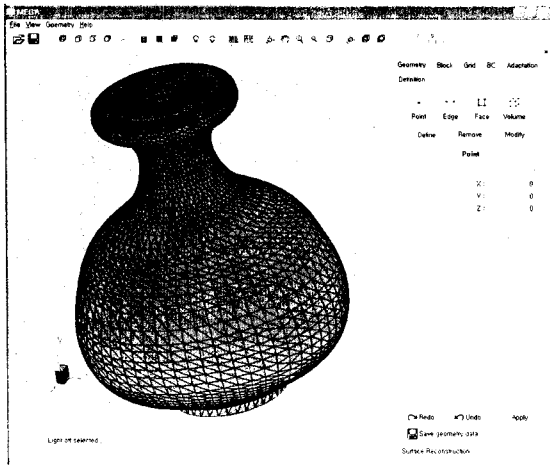


Fig. 1 Surface input by STL data format

- 육면체 격자는 해의 정확도를 향상시키는 추가적인 향을 가진 shape function의 사용이 가능하다.
- 육면체 격자는 정확도의 손실없이 한 방향의 격자 간격 조절이 가능하다. 대표적이 예가, 경계층 계산시 얇은 사면체 격자를 이용하는 것보다 얇은 육면체를 사용하는 것이 훨씬 유리하다.
- 육면체 격자계는 사면체 격자계에 비하여 전체적인 셀의 숫자를 작게 유지할 수 있다. 사면체 격자계는 육면체 격자계에 비해 보통 4에서 10배 정도로 많은 수의 격자셀을 사용하게 된다.

본 논문에서는 3차원 물체 표면상에 비정렬 사면형 격자계를 자동 생성하는 기법을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 방법은 대상 공간을 충분히 포함하는 적절한 크기의 직육면체 공간에 대해 작은 직육면체 셀들로 분할한 후, 물체 경계 내부에 포함된 내부셀들을 찾아내고, 그 표면 셀들을 물체 표면에 투영함으로써 대상 물체 표면상에 비정렬 사면형 격자계를 생성하는 기법이다. 이러한 기법을 Grid-base 기법 또는 Overlay 기법 등으로 부르며, 구조 해석 분야에서 유한 요소 해석에 필요한 육면체 격자 생성 기법으로 많이 연구되고 있다[2-3].

2. 표면 격자 자동 생성

일반적으로 복잡한 3차원 물체의 모델링은 3차원 CAD 시스템을 통하여 이루어지게 되는데, 대부분의 CAD 시스템들은 모델링된 물체의 표면 형상 데이터를 삼각형 조각들의 집합(STL 형식)으로 저장하는 기능이 있다. 본 연구에서는 물체의 외형 데이터는 삼각형 조각의 집합으로 주어지는 것을 전

제로 연구하였고, 본 연구에서 개발하고 있는 응용 프로그램에서는 STL 형식의 데이터를 입력으로 받아들인 후 다음에 설명되는 일련의 과정이 자동적으로 이루어지도록 구현하였다. Fig. 1은 본 연구에서 개발된 프로그램이 STL 형식의 외형 데이터를 읽어 들인 예를 보여 주고 있다.

본 프로그램에서는 우선 STL 포맷의 물체 외형 데이터를 읽어 들인 후 사면형 표면 격자계를 자동으로 생성하기 위하여 몇 가지 과정을 거치게 되는데, 이를 간략히 정리하면 다음과 같다. 각 단계의 설명에 해당하는 실행예를 Fig. 2를 기준으로 보여주고 있다.

- 1) 물체 외형 데이터(STL 형식의 삼각형 조각 집합)를 읽어 들인다.(Fig. 2a)
- 2) 물체의 외형을 충분히 포함하는 bounding box를 정한 후, bounding box 공간을 사용자가 원하는 해상도의 육면체 셀들로 반복적으로 분할한다. 물체 표면에 걸쳐있는 경계셀(fringe cell)들을 우선 찾고 나서, 물체 내부에 있는 내부셀(interior cell)들을 찾는다.(Fig. 2b)
- 3) 내부셀들의 외부 표면에 해당하는 격자계를 구성한다. 이때 주의할 것은 물체의 외형은 구형과 같이 모서리가 없는 물체도 있겠지만, Fig. 2의 예와 같이 모서리가 있는 물체일 경우 해당 모서리를 표면 격자계의 격자선이 정렬되어야 하는 특성 라인이다. 본 연구에서는 물체 외형 데이터의 이웃한 삼각형 조각 간의 이웃 각도가 법선 벡터를 기준으로 45도 이상 벌어진 경우 특성 라인으로 자동적으로 처리되도록 프로그래밍하였다. 그리고, (필요시 그 각도는 조절이 가능하다.) 그리고, 사면형들로 구성된 표면 격자계에 대해서도 위에서 설명한 특성 라인을 따라가게 될 격자선이 우선 찾아져야 한다. 이를 위해서 특성 라인들의 교점인 특성점(Fig. 2 예의 피라미드의 5개 꼭지점에 해당)을 우선 찾아낸 다음, 각 특성점에 가장 가까운 표면 격자점을 찾아낸다. 표면 격자계상의 특성점들이 찾아지고 나면, 각 특성점들은 연결하는 표면 격자계상의 최단 경로(shortest path)를 찾는 문제가 되며, 이는 graph theory에 근거한 Moor's Algorithm을 이용하여 표면상에서 두 점을 연결하는 최단 거리 조건과 해당 격자선이 투영될 물체 표면상의 특성 라인과의 거리가 최소가 되도록 하는 조건을 이용하여 자동적으로 찾아내도록 하였다[4]. Fig. 2c의 표면 격자계에서 굵은선이 피라미드의 각 특성라인에 투영될 격자선을 보여주고 있다.(Fig. 2c)
- 4) 다음은 표면격자계를 물체 표면에 투영하게 되는데, 이 과정을 돌로 나눠 보면 우선 특성점과 특성라인에 대응되는 격자점들이 투영된다.(Fig. 2d) 모서리 부분만 우선 투영되었음을 음영처리된 그림에서 확인할 수 있다.(Fig. 2e)

- 5) 그 다음에는, 나머지 격자점들이 물체 표면에 투영되는데, 이때 투영 벡터는 각 격자점들에 이웃한 주변 셀들의 법선 벡터의 평균을 이용한다. 따라서, 격자셀들이 불규칙하고 내부로 함몰된 부분들이 있으므로 투영된 결과는 격자선 겹침현상이 나타남을 알 수 있다.(Fig. 2f)
- 6) 위의 투영된 결과에 나타나는 격자선 겹침 현상을 타원형 격자 기법 등 격자 완화 기법을 이용하여 격자 질을 향상시켜 줌으로서 해결할 수 있다. 격자 완화 기법을 한 번 적용하였을 때의 격자(Fig. 2g)와 약 10회 정도 적용하였을 때의 격자(Fig. 2h)를 비교해보면 격자 질이 훨씬 향상되었음을 알 수 있다. 음영 처리를 한 영상에서 표면 격자는 물체의 표면 정의인 각 삼각형 조각위에 놓여 있음을 알 수 있다.(Fig. 2g-Fig. 2i)

위와 같은 방법으로 일반적인 3차원 물체 표면상에 비정렬 사변형 격자계를 자동으로 생성하는 것이 가능하다. 본 연구의 주된 목적은 격자 생성의 자동화에 초점을 둔 것으로서, 물체의 형상이 특이할 경우 격자 생성 분야에 경험을 갖춘 연구자가 문제의 특성을 고려하여 직접 격자의 토폴로지를 생각하면서 만들어내는 격자계와는 다른 결과가 얻어질 수 있다. 예를 들면, 앞의 설명에서 이용하였던 피라미드의 밑면을 보면 네 변을 따라서 마치 삼각형 셀들이 있는 것처럼 보이지만, 이 셀들은 사각형의 두변이 일직선상에 놓여 있는 경우로서, 격자계의 질 관점에서 보면 좋은 결과는 아니다.(Fig.2j) 이에 대해서는 개선의 여지가 있고, 이러한 문제점에 대한 해결책에 대하여 다른 연구자들이 제시한 경우가 있으므로 본 연구에서도 추후 이에 대하여 보강을 계획하고 있다.

3. 격자 생성 예

Fig. 3에서는 원통형 물체에 대한 표면 격자 생성의 예를 보여주고 있고, Fig. 4에서는 육면체위에 원통형 돌출부가 있는 경우의 예이다.

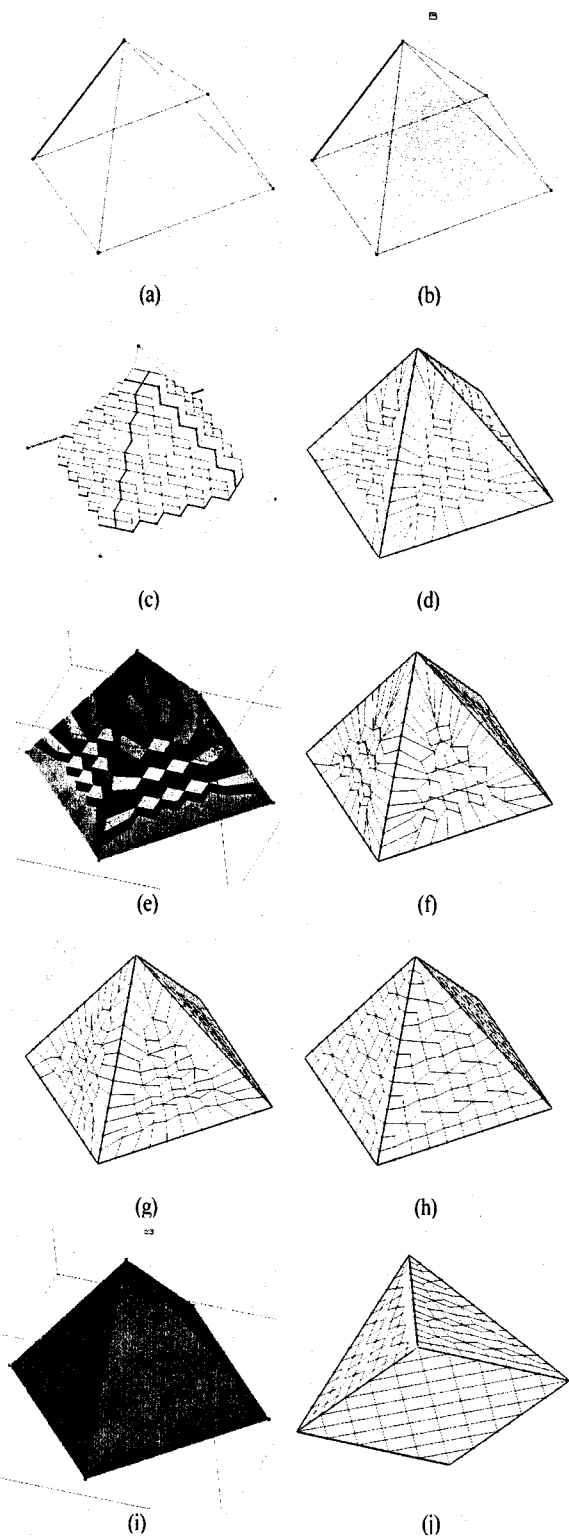


Fig. 2 Algorithm procedure

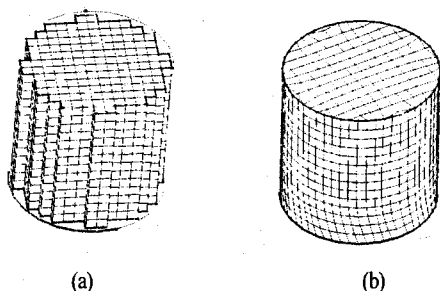
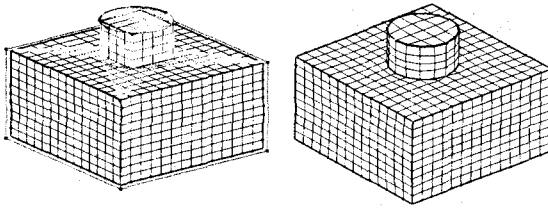


Fig. 3 Example for a cylindrical body



(a) (b)
Fig. 4 A box with a cylindrical extrusion

5. 결 론

본 연구에서는 임의의 3차원 물체 표면에 비정렬 사변형 격자를 자동으로 생성하기 위한 알고리즘에 대해서 연구하고, 이를 그래픽 환경에서 최소한의 필요한 대화형 작업과 함께 자동적으로 수행될 수 있도록 구현하였다. 현재로서는 해당 프로그램이 계속 수정/보완되고 있는 상태로서 개선의 여지가 있는 상태이긴 하지만, 3차원 격자 자동 생성을 위한 중요한 출발점이자 디딤돌이 될 것으로 생각된다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소의 기초연구과제의 지원에 의해 수행된 연구 결과의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] T. Blacker, 2001, "Automated Conformal Hexahedral Meshing Constrains, Challenges and Opportunities," *Engineering with Computers*, Vol.17, p.201-210, Springer-Verlag.
- [2] R. Schneiders, 1996, "A Grid-based Algorithm for the Generation of Hexahedral Element Meshes," *Engineering with Computers*, Vol.12, p.168-177, Springer-Verlag.
- [3] J. Shu and M. Gotoh, 1999, "An automated process for 3D hexahedral mesh regeneration in metal forming," *Computational Mechanics*, Vol.24, p.373-385, Springer-Verlag.
- [4] G. Chartrand and O. Oellermann, 1993, *Applied and Algorithmic Graph Theory, International Series in Pure and Applied Mathematics*, McGraw-Hill.