

CAD 형상 데이터를 이용한 비정렬 표면 격자계의 자동 생성 기법

이 봉 주,¹ 김 병 수^{*2}

AUTOMATIC GENERATION OF UNSTRUCTURED SURFACE GRID SYSTEM USING CAD SURFACE DATA

B.J. Lee¹ and B.S. Kim^{*2}

Computational Fluid Dynamics (CFD) approach is now playing an important role in the engineering process in these days. Generating proper grid system in time for the region of interest is prerequisite for the efficient numerical calculation of flow physics using CFD approach. Grid generation is, however, usually considered as a major obstacle for a routine and successful application of numerical approaches in the engineering process. CFD approach based on the unstructured grid system is gaining popularity due to its simplicity and efficiency for generating grid system compared to the structured grid approaches, especially for complex geometries.

In this paper an automated triangular surface grid generation using CAD(Computer Aided Design) surface data is proposed. According to the present method, the CAD surface data imported in the STL(Stereo-lithography) format is processed to identify feature edges defining the topology and geometry of the surface shape first. When the feature edges are identified, node points along the edges are distributed. The initial fronts which connect those feature edge nodes are constructed and then they are advanced along the CAD surface data inward until the surface is fully covered by triangular surface grid cells using Advancing Front Method. It is found that this approach can be implemented in an automated way successfully saving man-hours and reducing human-errors in generating triangular surface grid system.

Key Words : 삼각형 표면 격자(Triangular surface mesh), 프론트 전진 기법(Advancing Front Method), 자동 표면 격자 생성(Automated Surface Grid Generation), 격자 간격 조절(Grid Size Control)

1. 서 론

전산유체역학은 실험 유체 기법과 더불어 유동 현상 분석의 중요한 방법론으로서 점점 활용도가 증가하고 있다. 전산 유체역학은 유동 해석을 위해 유한 차분법, 유한 체적법, 그리고 유한 요소법등의 수치적 접근법들을 사용한다. 각 수치 기법들은 연립된 대수 방정식들을 풀게 되고, 이 과정에서 해석의 대상이 되는 공간을 작은 셀이나 요소로 나누어 주는 격자 생성 작업이 필수적으로 수행되어야 한다. 격자생성 과정에서 공간의 이산화가 수치기법에 의한 편미분 방정식

해의 정확도나 수렴성 등에 큰 영향을 미친다는 것은 잘 알려진 사실이다. 유동해석을 위해 선행되어지는 격자생성 작업은 수치기법에 의한 공학적 해석 과정에 있어서 종종 장애요인으로 작용하기도 한다. 요즘과 같이 유동 해석의 대상이 되는 물체의 형상이 더욱 구체적이고 복잡해짐으로써 격자 생성과 관련하여 이 문제는 더욱 그 중요성이 부각되고 있다.

격자생성에 사용되는 격자 계는 크게 정렬격자 계와 비정렬격자 계로 구분 할 수 있는데, 비정렬격자 계의 경우 정렬격자 계에 비해 실제적이고 복잡한 공간에 대해서 보다 유연하게 격자생성이 가능하며 그 활용도가 증가하고 있다. 그러나 비정렬격자 계의 생성이 상대적으로 쉽다고 하더라도 대상 물체의 형상이 복잡해질수록 표면격자 계의 생성은 여전히 쉽지 않다. 더구나 복잡한 물체의 경우 CAD 시스템을 이용하여 모델링되는 경우가 많으므로 CAD 형상 데이터를 이용하여 표면격자 계를 용이하게 생성하는 기법 개발이 비정

접수일: 2007년 11월 20일, 심사완료일: 2007년 12월 3일.

1 학생회원, 충남대학교 대학원 항공우주공학과

2 종신회원, 충남대학교 항공우주공학과

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

릴 격자계의 활용도를 더욱 높이는데 있어서 중요한 선결 과제라 하겠다.

또한 격자셀의 적절한 크기조절도 격자 생성작업 중 고려되어야 할 중요사항 중 하나이다. 격자셀의 크기 조절은 해당 격자계를 이용하여 얻어지는 유동해의 정확도와 효율성을 높이기 위해서 확보되어야 하는 매우 중요한 사항이다. 즉, 유동변수의 변화가 큰 영역에서는 정확한 유동장 계산을 위해서 작은 크기의 격자셀을 분포시켜야 하고, 상대적으로 변수의 변화가 없는 영역에는 격자셀의 낭비를 막고 계산량을 줄임으로써 효율적인 유동 계산이 이루어지도록 적절하게 큰 크기의 격자셀을 분포시켜야 한다. 격자셀의 크기 분포 지정은 일반적으로 배경격자(background grid)를 이용한 내삽에 의해 이루어진다. 배경격자를 이용한 격자 크기 조절법은 비정렬 생성 작업에서 가장 많이 사용되는 방법이지만, 배경격자의 생성이 실제 격자 생성과는 별도로 수행이 되어야 한다는 문제점과 함께, 격자 크기를 계산해야 하는 대상점이 격자셀을 찾고 그 셀 내에서의 위치에 근거하여 내삽 계산을 수행해야 한다는 특징이 있다.

본 연구에서는 새로운 격자 크기 조절법을 적용하여 비정렬 삼각형 격자계를 CAD시스템에서 모델링된 3차원 물체 표면에 자동 생성하는 기법을 제안한다.

2. CAD 형상데이터

구나 실린더와 같이 단순한 형상과 달리 3차원의 복잡한 물체의 모델링은 3차원 CAD 시스템을 이용하여 수행하게 되고, 모델링된 대상 물체의 형상 데이터가 격자 생성 시스템으로 전달되면 본격적인 격자 생성작업이 이루어지게 된다. 모델링된 형상데이터를 전달하기 위해서는 중립파일(neutral file)이라 부르는 중간 데이터 베이스 구조를 도입함으로써 효과적으로 처리할 수 있다[1,2]. 중립파일의 대표적인 예로써 IGES파일 형식은 복잡한 물체의 형상 데이터 전달에 많이 활용되고 있으나 전산유체역학 분야에서 격자 생성을 위한 형상데이터로 활용함에 있어서 패치들 간의 중첩이나 괴리 현상과 같은 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점 때문에 대부분의 상용 격자 생성코드들은 IGES파일을 읽어 들인 후 인위적인 수정작업을 하도록 하고 있다.

본 연구에서는 CAD시스템에 의해서 모델링 된 형상 데이터를 가능한 한 수작업을 배제 하고 자동으로 삼각형 표면 격자계를 생성하는 것을 주요 내용 중의 하나로 하고 있다. 궁극적으로는 IGES 형식과 같이 원래의 형상을 가능한 한 정확히 표현하는 중립 파일을 이용하여 격자 생성이 자동화되어야 하겠지만, 현 시점에서는 격자 생성의 자동화에 주안점을 두어서 또 다른 형식의 중립 파일인 STL 형식의 데이터를

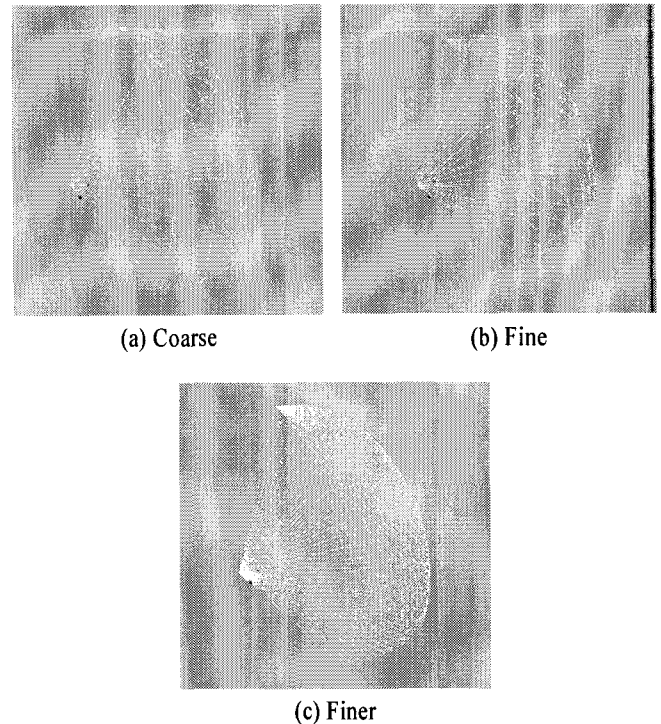


Fig. 1 STL files with different resolutions

이용하기로 한다.

STL 데이터는 모델링된 물체의 외형만을 삼각형 조각들로 대체하여 전달하는 방식으로서, 표면 격자 생성의 관점에서 보면 물체 외부 형상을 충분히 조밀한 해상도의 작은 삼각형 조각들로 대체하여 IGES 파일이 갖고 있는 틱새나 중첩 등의 문제를 갖지 않을 수 있다. 이와 더불어 STL데이터 구조의 간결성은 표면 격자 생성의 자동화 관점에서는 큰 장점이 될 수 있다. Fig. 1에서는 CATIA에서 모델링된 동일한 물체를 3가지의 서로 다른 해상도의 삼각형 조각으로 저장한 STL 데이터를 비교하여 보여주고 있다.

3. 삼각형 표면 격자의 자동 생성

앞서 설명한 바와 같이 STL 형식의 데이터는 물체의 외형 정보를 삼각형 셀들로 대체하여 전달하게 되는데, 이때 전달되는 데이터는 삼각형 셀들의 세 꼭지점의 좌표와 물체의 내외부를 구분하기 위한 법선 벡터만으로 구성되어 있다. 따라서 물체를 모델링하는 단계에서 사용되는 여러 가지 위상학적인 또는 기하학적인 정보, 가령 모델링된 물체가 6면체인지 또는 구형 물체인지에 대한 정보도 사라지게 된다. 즉 물체의 위상 정보를 알려주는 꼭지점, 모서리, 면 등에 대한 정보는 전달되지 않는다는 것이다. 따라서 일단 STL 형식의 CAD 형상 데이터가 입력되고 나면 우선 이루어져야 하는 작업이 꼭

지점, 모서리, 면과 같이 중요한 위상학적 정보를 알려주는 기하학적 요소를 찾아내는 작업이 될 것이다. 설명의 편의상 꼭지점을 feature node, 모서리를 feature edge라고 부르도록 한다.

STL 형상 데이터의 입력에서부터 feature node와 feature edge 찾기를 포함하여 표면 삼각형 격자 생성이 자동으로 수행되도록 하기 위하여 이루어지는 일련의 작업을 Fig. 2(a)와 같이 반구와 육면체로 구성된 물체를 예로 하여 단계별로 설명하면 다음과 같다.

- 1) 물체의 CAD 형상 데이터(STL 형식)를 읽어 들인다.(Fig. 2(b))
- 2) 물체의 꼭지점과 모서리에 해당하는 feature node 와 feature edge를 찾는다. 이를 위하여 우선 feature node를 찾는데, 이웃한 삼각형 셀의 법선 벡터끼리의 각도를 계산하여 지정된 임계값(45°)보다 작으면 feature edge로 등록된다. Feature edge 찾기가 모두 끝나면 feature edge가 2개 이상 만나는 점은 feature node로 등록이 된다.(Fig. 2(c))
- 3) 다음은 서로 연결된 feature edge의 체인을 찾아냄으로써 서로 다른 면을 구분할 수 있게 된다. 즉 Fig. 2(b)에서의 STL 삼각형 셀들은 모두 서로 연결되어 있어서 면 구분할 수 없으나 feature edge의 체인으로 둘러싸인 면들이 구분되면 비로소 개개의 면을 따로 그리거나 계산 과정에서 필요한 정보로 이용할 수 있게 된다.(Fig. 2(d))
- 4) 다음은 feature edge를 따라서 원하는 개수의 격자점을 분포시킨다.(Fig. 2(e))
- 5) Feature node를 따라 분포된 격자점을 연결한 선들이 초기 front가 되어 AFM(Advancing Front Method) 방법에 의해 표면 격자 생성 작업을 수행하게 된다.(Fig. 2(f))
- 6) 다음은 AFM 방법에 의하여 각각의 front들이 차례로 전진을 하게 된다.(Fig. 2(g)) 내부로 전진이 이루어지면서 front로 둘러싸인 면적이 점점 좁아지면서 최종적으로 면적이 0이 될 때까지 전진이 이루어지면 해당 면에 대한 표면격자 생성이 완료된다. 한편, 2차원 평면에서의 AFM 방법에서는 전진이 평면상에서 이루어지므로 큰 문제가 없겠지만, 물체 표면에서의 AFM 방법의 적용을 위해서는 주어진 물체 표면을 따라서 전진이 이루어져야 한다. 따라서, 초기의 전진 방향만으로 전진을 시킬 경우 면이 평면이 아닌 경우에는 물체 표면을 따라가지 못하게 된다.(Fig. 2(h))
- 7) 따라서, 매번 front의 전진이 이루어질 때 마다 해당 front가 속한 물체 표면에 투영을 시키는 작업을 해줌으로써 이 문제를 해결한다.(Fig. 2(i))
- 8) 위와 같이 물체 표면의 투영을 병행하면서 front의 전진

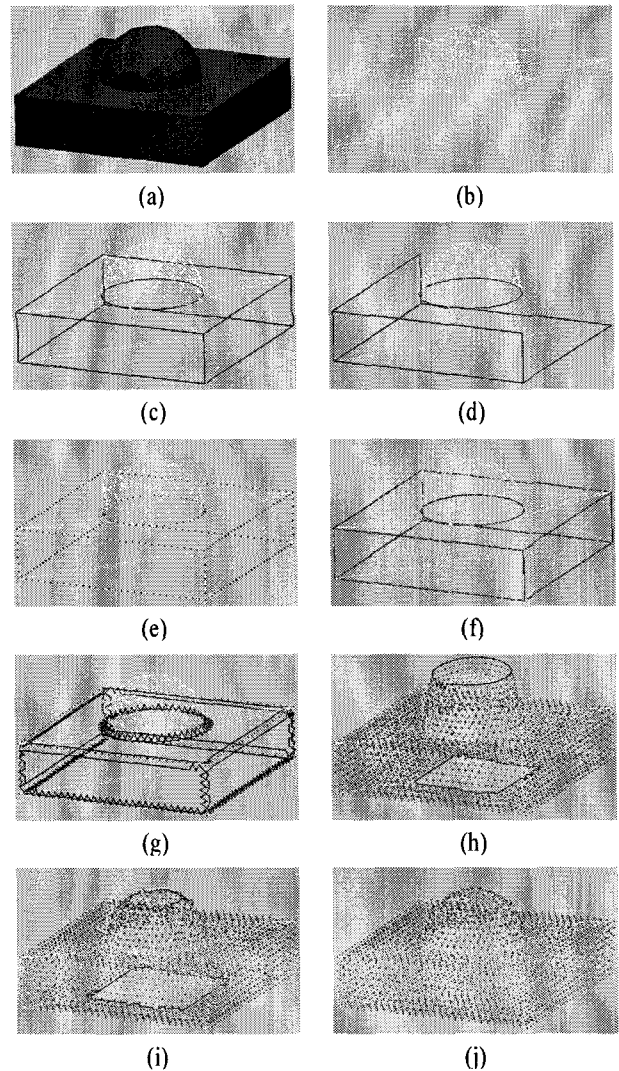


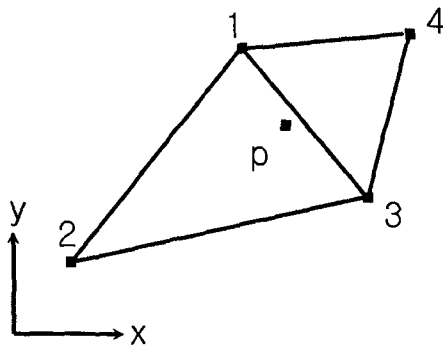
Fig. 2 Algorithm procedure

이 모두 마무리되면 물체 표면을 완전히 뒤덮는 삼각형 표면 격자의 생성이 완료된다.(Fig. 2(j))

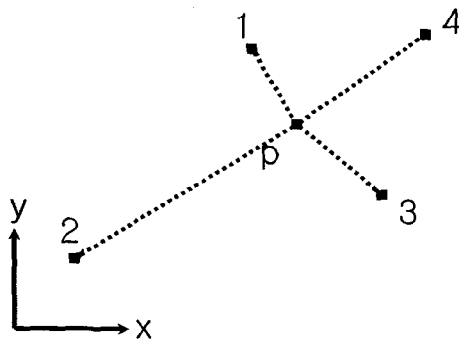
이상과 같이 설명한 표면 격자 생성 기법을 이용하면 다양한 형태의 CAD 형상 데이터에 대해서 비정렬 삼각형 표면 격자 생성을 자동으로 수행할 수 있다. 이 과정에서 기존의 배경격자를 이용한 기법이 아닌 본 연구가 제안하는 새로운 기법을 적용하여 격자 간격을 조절하도록 하였으며 이는 다음 장에서 설명하도록 한다.

4. 격자셀 크기 지정 기법

격자셀의 적절한 크기 조절은 격자의 질 향상을 위해서 뿐만 아니라 궁극적으로 해당 격자계를 이용하여 얻어지는 유



(a) Background mesh method



(b) New sizing method

Fig. 3 Interpolation of mesh size information

동해의 정확도와 효율성을 높이기 위해서 확보되어야 하는 매우 중요한 요건이다. 즉, 유동 변수의 변화가 큰 영역에서는 정확한 유동장 계산을 위해서 작은 크기의 격자셀을 분포시켜야 하고, 상대적으로 유동 변수의 변화가 없는 영역에는 격자셀의 낭비를 막고 계산량을 줄임으로써 효율적인 유동 계산이 이루어지도록 적절하게 큰 크기의 격자셀을 분포시켜야 한다.

격자 생성 작업에서 격자셀의 크기 분포 지정은 격자셀 생성 작업을 하기 전에 미리 지정되는 것이 일반적이고, 이 경우 격자셀 크기 함수(sizing function)에 의해 유동장내의 임의의 점에서의 격자셀 크기가 $\delta = f(\vec{x})$ 형태의 함수로 계산되게 된다. 여기서 δ 는 격자셀 크기를 의미하고, \vec{x} 는 공간 좌표를 의미한다. 그러나 일반적으로 위와 같이 격자셀의 크기를 해석식의 형태로 공간 좌표의 함수로 지정할 수 있는 경우는 특별한 유동장의 경우를 제외하고는 거의 없고, 대부분의 경우는 유한한 지점에 지정된 크기 정보를 이용하여 선형 내삽 계산을 통하여 구해지게 된다. 즉, 사용자의 선택이나 유동장의 기하학적 정보를 이용하여 지정된 유한한 갯수의 격자 조절 요소들로부터 임의의 점에 대한 격자 크기 정보를 계산하게 되는데, 이 때 많은 경우 배경 격자(background grid)

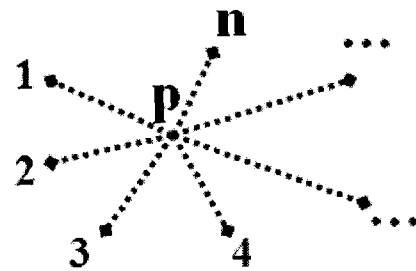


Fig. 4 Cell size interpolation from n control points

를 이용하여 내삽이 이루어진다. 많이 사용되는 배경 격자의 형태로는 2차원 유동장 기준으로 비정렬 삼각형 격자(3차원의 경우는 사면체 격자)를 이용하기도 하고[3,4], quadtree 형식의 비정렬 사각형 격자(3차원의 경우는 octree 형식의 비정렬 육면체 격자)를 사용하거나[5], 또는 정렬 사각형 격자(3차원의 경우는 육면체 격자)를 이용하기도 한다[6].

배경 격자를 이용한 격자 크기 조절법은 비정렬 격자 생성 작업에서 가장 많이 사용되는 방법이긴 하지만, 비록 계산 시간이나 계산량이 많지는 않더라도 배경 격자의 생성이 실제 격자 생성과는 별도로 수행이 되어야 한다는 문제점과 함께, 격자 크기를 계산해야 하는 대상점이 속한 격자셀을 찾고 그 셀 내에서의 위치에 근거하여 내삽 계산을 수행해야 한다는 특징이 있다.

본 연구에서 제시하고 있는 자동 표면 격자 생성에 있어서도 격자의 간격 조절은 필수 요소이다. 격자 간격 조절기법들 중 일반적으로 사용되는 배경 격자(background grid)를 이용한 격자 간격 조절 기법의 경우 공간상에 분포된 격자 조절 요소들 중에서 계산 대상점을 포함하는 배경 격자셀의 꼭지점을 기준으로 격자셀 내부에 대한 선형 내삽을 하는 방식이므로 격자 생성 작업 전에 배경 격자계를 구성해야 한다는 문제가 있다. 또한 격자 조절 요소들 중에서 계산 대상점을 포함하지 않는 격자셀의 꼭지점은 대상점의 격자 간격 계산에서 조절 요소로서 배제가 된다는 특성을 가지고 있다. 이 특성에 대한 경우에 대상점을 포함하지 않는 인접한 셀의 격자 조절 요소들 중 한 점이 대상점을 포함하고 있는 셀의 격자 조절 요소보다 가깝다면 대상점을 포함하고 있지 않는 셀의 조절요소라 할지라도 그 조절 요소의 정보가 더 중요시 되어야 적절한 것이다.

따라서, 본 연구에서는 배경 격자를 생성하는 대신에 Fig. 3(b)에서처럼 유동장내에 분포된 모든 격자 크기 조절 요소들에 대해서 계산 대상점과의 거리를 기준으로 하여 거리에 반 비례하여 조절요소의 크기 정보에 가중치를 크게 적용하여 계산하는 방법을 사용함으로써 위의 Fig. 3(a)에서와 같은 경우의 문제점을 배제할 수 있고, 나아가 배경 격자 생성의 필

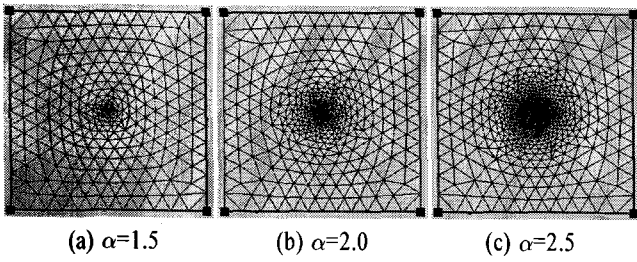


Fig. 5 Effects of α -parameter

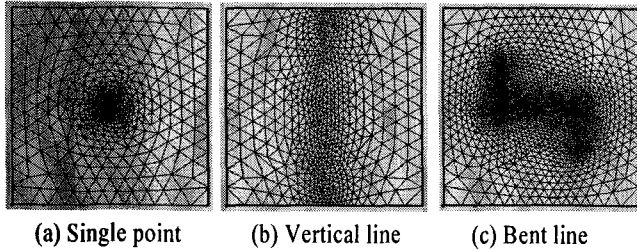


Fig. 6 Examples of 2-D grid size control ($\alpha = 2$)

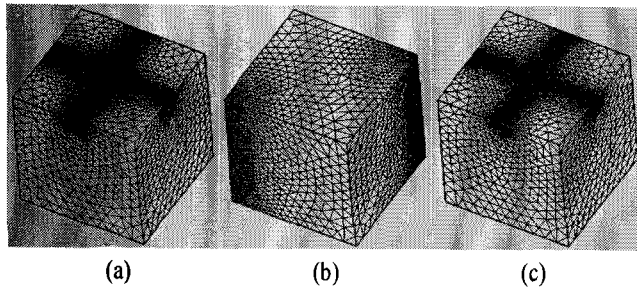


Fig. 7 Examples of size control and grid generation

요성도 없앨 수 있도록 하였다.

Fig. 4와 같이 n 개의 격자 조절 요소(점요소)가 분포되어 있는 유동장 영역에 대해서 p 점에 대한 격자 크기를 계산하고자 할 경우, 본 연구에서 제안하는 방법에 의하면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\delta_p = \sum_{i=1}^n w_i \delta_i$$

여기서 δ_p 는 p 점에서의 격자 크기이고, w_i 는 i -번째 격자 조절 요소의 p 점에 대한 가중치, 그리고 δ_i 는 i -번째 격자 조절 요소에 지정된 격자 크기 정보이다. 그리고 가중치 w_i 들은 다음과 같은 normalization condition을 만족시켜야 한다.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

위 식에서 가중치 w_i 를 정하는 방법으로는 각 조절 요소와 대상점 p 와의 거리에 대한 함수이면서 거리가 가까운 조절 요소에 대한 가중치가 상대적으로 먼 요소에 비해서 커야 하고, normalization condition을 만족시켜야 하므로 다음과 같은 식을 사용하는 것이 우선 가능할 것이다.

$$w_i = \frac{1/d_i}{\sum_{k=1}^n 1/d_k}$$

여기서 d_i 는 i -번째 조절 요소와 p 점까지의 거리이다. 위 가중치 관계식은 단지 거리의 역수에 근거한 식인데, 이를 변형하여 격자 크기 조절의 융통성을 확보할 수 있다.

이를 위하여 두 지점간의 근접도(closeness)를 거리의 역수로 정의하면 아래식과 같으며,

$$c_i = 1/d_i$$

이를 다시 w_i 에 대한 식에 적용하면,

$$w_i = \frac{c_i^\alpha}{\sum_{k=1}^n c_k^\alpha}$$

$$\delta_p = \sum_{i=1}^n w_i \delta_i$$

위와 같이 변형된 가중치 식을 사용하여 일반적으로 n 개의 격자 간격 조절 요소를 갖는 유동장에 대한 임의의 점 p 에서의 격자 간격을 계산함으로써 격자 간격 조절을 할 수 있게 된다. 위 식에서 지수 α 는 각 조절 요소의 점 p 에 대한 영향력을 조절할 수 있는 파라미터로서, α 가 커질수록 가까운 조절 요소의 영향이 커지고, α 가 작아질수록 그 영향력이 줄어들게 함으로써 격자 간격 조절의 융통성을 확보할 수 있다.

α -파라미터의 효과를 확인해보기 위해 한 경우에 대해서 α 값만 달리하여 격자 생성을 한 결과가 Fig. 5에 나와 있다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 α 값이 커질수록 중앙과 주변 네 꼭지점에 분포된 격자 조절 요소의 영향이 멀리까지 미치는 것을 확인할 수 있다.

이 방법이 본 연구에서 제안하는 소위 근접도에 근거한 전역 내삽 기법(closeness-based global interpolation method)이고, 이 기법을 사용함으로써 배경 격자 생성 없이도 주어진 격자 조절 요소들에 대한 거리(혹은 그 역수인 근접도)를 이용하여

임의의 점에 대한 격자 크기의 계산이 가능하다. 여기서 격자 조절 요소와의 거리는 각 조절 요소와 계산 대상점과의 최단 거리를 이용한다.

Fig. 6에서는 새로운 격자셀 크기 지정법을 이용하여 정사각형 영역에 대한 격자셀 크기 조절 및 삼각형 격자 생성의 예를 보여주고 있다. Fig. 6(a)의 경우 중앙에 작은 격자 간격을 지정한 점요소가 있는 경우이고, (b)의 경우는 수직방향으로 선분 요소를, (c)는 중앙에 \sphericalangle 형상의 요소를 분포시킨 경우의 격자 생성 결과이다.

5. 격자 생성의 예

이상에서 설명한 자동 표면 격자생성 기법과 새로운 격자셀 크기 지정 기법을 응용하여 몇 가지의 서로 다른 격자 간격 조절 요소를 분포시켜서 육면체 영역에 대한 격자 생성을 수행한 결과를 Fig. 7에서 보여주고 있다. 이 격자 생성 결과들은 STL 형식으로 넘어온 CAD 형상 데이터를 입력받은 후 격자 간격 조절 기법을 적용한 Advancing Front Method에 근거하여 표면 격자계를 자동으로 생성을 수행한 예들이다.

6. 결 론

본 연구에서는 임의의 3차원 물체 표면에 비정렬 삼각형 격자를 자동으로 생성하고 이와 함께 근접도에 근거한 전역 내삽기법을 통해 격자셀 크기를 조절하는 기법에 대해서도 연구하였다. 위에서 살펴본바와 같이 물체 표면 형상 정보가 STL 형식으로 주어지는 경우 표면 격자 생성이 자동으로 이루어질 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 비정렬 격자 생성에 필요한 격자크기 조절을 위해 일반적으로 사용되는 배경 격자에 근거한 기법이 아닌 근접도에 근거한 전역적인 내삽

을 통해 격자 간격을 지정하는 새로운 기법을 적용함으로써 배경격자 계를 따로 생성할 필요가 없다는 장점과 함께 각 조절 요소들에 대한 가중치 계산식에 사용된 알파 파라미터의 조절에 의해 격자 간격 조절의 융통성을 확보하고 추가적인 격자셀 크기 조절 기능을 가질 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 한국형헬기 민군겸용구성품개발사업(KARI 주관) 위탁연구결과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2000, 김성환 외 공역, *CAD/CAM/CAE 시스템*, 피어슨 에듀케이션 코리아.
- [2] 1995, 이종원 외, *CAD/CAM 시스템*, 청문각.
- [3] 2002, Zhu J., Blacker T., and Smith R., "Background Overlay Grid Size Function," *11th International Meshing Roundtable*, Ithaca, New York, USA.
- [4] 1993, Pirzadeh S., "Structured Background Grids for Generations of Unstructured Grids by Advancing-Front Method," *AIAA Journal*, Vol.31, No.2, pp.257-265.
- [5] 2004, Deister F., Tremell U., Hassan O., and Weatherill N., "Fully automatic and fast mesh size specification for unstructured mesh generation," *Engineering with Computer*, Vol.20, pp.237-248.
- [6] 1990, P. Parikh, S. Pirzadeh, and R. Lohner, "A Package For 3-D Unstructured Grid Generation, Finite-Element Flow Solution and Flow Field Visualization," *NASA Contractor Report 182090*.