Predictor-Corrector를 활용한 외부 유동장 격자 생성 기법

김 병수*

A Grid Generation Technique for the External Flow Fields Utilizing the Predictor-Corrector Scheme

B. S. Kim

In this paper a new structured grid generation technique is introduced. This new technique utilizes predictor-corrector approach, and is a marching scheme in the global sense as the hyperbolic scheme is. In the predictor step, one layer of grid cells is obtained by using Modified Advancing Front Method which generates a collection of quadrilateral cells simultaneously. In the corrector step, the layer of grid cells that is calculated in the predictor step is adjusted by solving Laplace equations to prevent grid lines from skewing and overlapping in highly curved configurations. It is shown that the resultant algorithm, named a **MAP** scheme, which combines the **M**odified **A**dvancing Front Method as a **P**redictor with an elliptic scheme as a corrector can be used to generate globally smooth and locally near-orthogonal grids for external flow fields even for highly curved configurations. Examples of grid generations for external flow fields about several configurations by use of the present approach are given, and its applicability and flexibility have been demonstrated and discussed.

Key Words: 전산유체역학(CFD), 계산 격자(Grid), 격자 생성(Grid Generation), 예측-수정 기법(Predictor-Corrector Scheme), Advancing Front Method(AFM), 타원형 격자 생성 방법(Elliptic Grid Generation Method), 쌍곡형 격자 생성 방법(Hyperbolic Grid Generation Method)

1. 서론

전산유체역학을 이용한 유동장의 해석은 그 기법이나 실용성의 면에서 꾸준한 발전을 거듭하고 있다. 전산유체역학은 연속체 가정하의 유동에 대하여 유한한 갯수의 계산점에서 그 유동 지배방정식의 해를 수치적 방법으로 구함으로써 유동현상을 해석하게 되는데, 이러한 계산점들을 유효 적절하게 분포시키는 문제는 유동해의 정확도나 계산시간의 효율성 등에 중요한 영향을 미치게 된다.

전산유체역학에서 이용되는 계산 격자의 종류는 유동방정식의 수치해 기법과 밀접한 관계를 갖고 있지만, 일반적으로 정렬격자와 비정렬격자로 나눌 수 있고, 격자의 종류에 따라 그 생성방법이나 장단점 등, 그 특성에서 큰 차이를 보인다.

정렬격자생성을 위한 기법으로는 크게 대수적 방법, 편미분 방정식의 해를 이용하는 기법, 그리고 등각 사상 방법 등으로 구분할 수 있다. 여러 가지 종류의 격자생성기법과 자세한 이론적 전개는 Thompson 등에 의해 잘 정리가 되어 있다.[1] 한편, 수치기법에 근거한 격자생성기법이 보편화됨에 따라 복잡한 형상이나 3차원 문제에 대한 활용에 한계가 있는 등각 사상 방법보다는 앞의 두 가지 기법이 일반적인 정렬격자 생성기법으로 활용되고 있다. 편미분 방정식의 해를 이용하는 방법은 대상 편미분 방정식의 특성에 따라 타원형 기법(elliptic method), 쌍곡형 기법(hyperbolic method), 그리고 포물형 기법(parabolic method) 등으로 세분된다. 대수적

* 정회원, 충남대학교 항공우주공학과

방법은 내부유동장에 대한 격자생성기법으로 많이 이용되고 있는데, 유동장 경계상에 분포된 격자점들의 좌표로부터 내부격자점들의 좌표를 적절한 형태의 내삽을 통하여 계산해 내는 방법이다. 이 방법은 격자생성과 관련한 계산량이나 속도면에서 여타의 기법보다 좋은 장점을 갖고 있어서 거의 대부분의 상용 격자생성코드는 여러 종류의 내삽법을 이용할 수 있는 대수적 기법을 제공하는 것을 기본 요건으로 하고 있다. 그러나 대수적 기법에 의한 격자는 경계 형상의 굴곡이 내부 격자로 전파되는 등 매끄러운 격자의 생성에는 한계가 있고, 또 내부격자의 간격을 조절하거나 직교 조건을 적용하는 것이 용이치 못하기 때문에, 단순한 형상의 경계를 갖는 유동장에 대한 격자생성의 경우가 아니면 대부분의 경우 타원형 기법을 이용하여 격자를 생성하게 된다. 타원형 기법에서는 격자생성을 위하여 타원형 편미분 방정식의 해를 구하게 된다. 일반적으로 수치 해법상 타원형 미분방정식의 해는 반복 계산법을 주로 이용하고, 그 경우 초기조건을 필요로 하게 되는데, 이러한 초기조건으로 대수적 기법에 의한 격자계를 주로 이용한다. 대수적 기법이든 타원형 기법이든 그 특성상 대상 유동장의 경계를 따른 격자점의 분포가 미리 정해져 있어야 한다. 물론 외부 유동장에 대한 격자 생성에도 위의 기법들이 이용이 될 수는 있으나, 그를 위해서는 바깥 경계의 형상과 그를 따른 격자점 분포가 격자생성에 선행되어야 한다. 이러한 특성으로 인하여 이 두 가지의 격자 생성 기법은 내부 유동장에 대한 격자 생성에 주로 이용이 된다.

한편, 쌍곡형 기법은 격자선 직교 조건과 격자 간격 조건으로부터 얻어지는 쌍곡형 편미분 방정식의 해를 구함으로써 격자를 생성하는 기법이다. 쌍곡형 편미분 방정식의 해는 그 특성상 초기조건을 이용하여 제 3 의 좌표축을 따라 전진하면서 해를 구하게 되는, 소위 초기치 문제(Initial Value Problem)이다. 이와 같은 전진형 특성으로 인하여, 쌍곡형 격자생성기법은 무한 공간 속에 물체가 놓여 있는 외부 유동장에 대한 격자생성에 주로 이용이 된다. 그런데, 쌍곡형 기법의 경우 초기조건에 해당하는 물체 형상에 지나친 굴곡이 있거나 오목한 부분이 있을 경우, 격자선이 물체로부터 멀어져 감에 따라 인접한 격자점들이 점점 한 곳으로 모이거나 심한 경우 격자선이 겹치게 되는(grid-line crossing) 현상이 발생하게 된다. 따라서 지배방정식에 인공점성항을 추가시켜서 이러한 현상을 완화시키는데, 일반적으로 경계 형상의 오목한 정도가 과도할 경우 격자의 찌그러짐이나 격자선의 겹침을 방지하는 데에는 한계가 있다.

이와 같이 여러 가지 격자 생성기법들이 각각의 장단점과 적용 한계를 갖고 있으므로 이러한 격자생성기법들을 적절히 혼용하여 사용하는 혼합형 기법에 관한 연구도 활발하다. Steger 는 쌍곡형 미분방정식과 타원형 미분방정식을 조합하여 만들어지는 새로운 미분방정식의 해를 통하여 격자생성을 하는 기법에 대하여 연구하였다.[2] 한편, Cordova 는 쌍곡형 미분 방정식의 해로서 얻어진 격자를 타원형 미분 방정식을 이용하여 수정하는, 소위 예측-수정(predictor-corrector) 기법을 제안하여, 쌍곡형 기법만으로는 적절한 격자생성이 불가능한 형상에 대해서도 성공적으로 격자를 생성할 수 있음을 보였다.[3]

본 논문에서는 Cordova 의 예측-수정 기법을 발전시킨, 새로운 형태의 격자 생성 기법을 소개하고자 한다.

2. 접근 방법과 이론

본 기법은 예측-수정(predictor-corrector) 기법을 활용한 격자 생성법으로서, 예측(predoctor) 단계에서는 Modified Advancing Front Method 를 이용하고, 수정(corrector) 단계에서는 타원형 기법을 이용한다. 즉, Modified Advancing Front Method 를 이용하는 예측 단계에서는, 쌍곡형 미분방정식을 푸는 대신, 격자선 상의 각 격자점에서의 기하학적 수직 벡터와 지정된 격자 간격을 이용하여 각 격자선을 한 셀씩 전진을 시킨다. 이 방법은 미분 방정식의 해를 구해야 하는 쌍곡형 기법보다 수학적으로 간단하고, 또 전진 방향을 수직벡터 방향과는 다른 방향으로 선택해야 하는 경우 등에 대하여 커다란 융통성을 갖는다. 이와 같이 예측 단계에서 한 셀만큼 격자선이 전진이 되고 나면, 새로이 얻어진 격자선을 따라 타원형 방정식의 하나인 라플라스 방정식을 적용하여 그의 해를

통하여 격자점의 위치를 조정하게 되는데, 이를 수정 단계라고 한다. 각 격자선에 대하여 타원형 기법을 적용하는 본 기법은 쌍곡형 격자생성기법으로는 인공점성항을 포함시키더라도 적절한 격자생성이 어려운 형상의 물체 주위의 외부유동장에 대해서도 손쉽게 적절한 격자생성이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 또한, 본 기법은 외부유동장 뿐만 아니라, 약간의 변형을 통하여 내부유동장에 대한 격자 생성과 3-차원 문제에도 적용 가능하다.[4,5]

예측 단계와 수정 단계와 관련한 이론은 다음과 같다.

2.1 predictor 단계

원래 Advancing Front Method(AFM)는 주어진 경계 형상을 따라 분포된 격자점들을 한 cell 씩 전진을 시킴으로써 대상 유동장을 삼각형 격자셀로 채워 넣는 비정렬 격자생성기법으로 Lo 에 의해 소개가 된 후, 현재도 비정렬 격자생성에 많이 이용되는 기법이다.[6] 본 연구의 Modified AFM 방법은 AFM 방법의 전진기법을 활용하면서도 그와는 달리 경계 형상을 따라 분포된 격자점들을 각각의 전진 방향과 전진거리에 따라 동시에 전진을 시킴으로써 해당된 숫자만큼의 사각형 격자셀들을 생성시키고 새로운 격자선을 찾아내는 기법이다. 여기서 전진방향은 벡터로 표시될 수가 있고, 외부유동장에 대한 격자생성의 경우 그 벡터는 격자점에서 격자선에 수직한 벡터를 취하는 것이 격자의 질을 향상시킬 수 있다. 이러한 수직벡터는 대상 격자점의 기하학적 정보만으로 쉽게 구할 수 있는데, 3 차원 문제의 경우 다음과 같은 식으로 주변 격자선들의 벡터적(cross product)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\vec{V}_{normal} = \frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} \frac{\vec{v}_i \times \vec{v}_{i+1}}{|\vec{v}_i||\vec{v}_{i+1}|}, \ \vec{v}_{I+1} = \vec{v}_1 \qquad (1)$$

여기서 I 는 격자점을 둘러싸고 있는 주변 격자점의 갯수이고, $\vec{v}_i$ 는 대상 격자점에서 주변 격자점까지의 벡터이다. 식(1)은 3 차원 형상의 경우 육면체의 꼭지점(Fig 1(b)의 점 S)과 같이 주변 격자점의 갯수가 4 개가 아닌 격자점, 즉 특이점(singular point)들에 대해서도 적용할 수 있다. Fig. 1 에 2 차원과 3 차원 형상에 대한 각 격자점에서의 수직벡터, $\vec{V}_{normal}$,의 예를 보여 주고 있다.

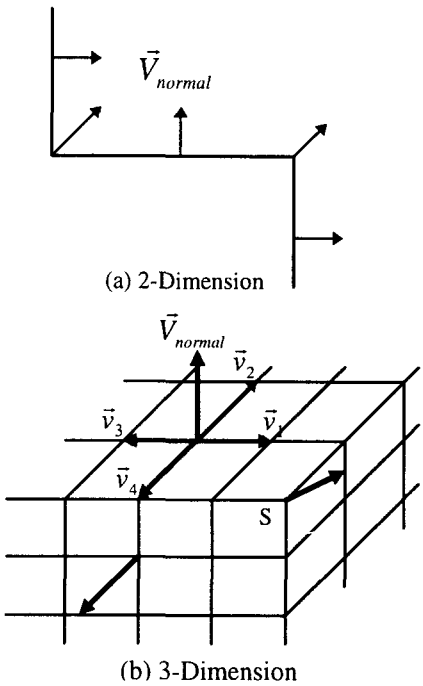


Fig.1 Examples of the normal vectors

격자선의 전진이 위와 같이 각 격자점에서 수직한 방향으로 이루어진다면 격자의 질을 결정하는 한 요소인 격자선의 직교성을 좋게 함으로써 좋은 질의 격자생성을 가능케 한다. 무한 공간 속의 익형주위 유동과 같이 외부 유동장에 대한 격자생성이 그러한 예이다. 따라서, 이와 같이 얻어진 수직벡터를 전진벡터로 이용하게 된다. 즉,

$$\vec{V}_{advance} = \vec{V}_{normal} \qquad (2)$$

이와 같이 단위 길이의 전진벡터 $\vec{V}_{advance}$ 가 구해지면, 격자선상의 각 격자점을 전진시켜서 새로운 격자선과 격자점의 위치를 구할 수 있다. 즉, 다음과 같은 식으로부터 새로운 격자점의 위치 $\vec{X}_{new}$ 를 구하게 된다.

$$\vec{X}_{new} = \vec{X}_{old} + d_{advance}\vec{V}_{advance} \qquad (3)$$

여기서, $d_{advance}$ 는 전진이 이루어지는 간격으로서, 쌍곡형 기법에서처럼 물체에 수직한 방향으로의 격자간격이 사용자에 의해 미리 정의되기도 하고, 문제에 따라서는 격자선 끝점에서 주어진 고정된 격자간격에 의해 결정되기도 한다.

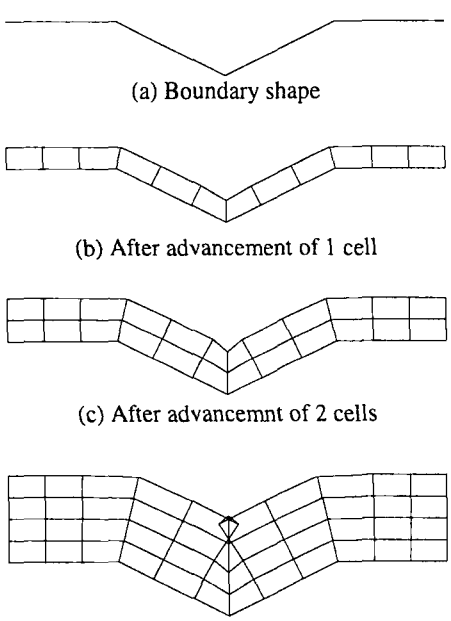


Fig. 2 Collision of grid lines from a concave boundary (without the corrector step)

한편, 이와 같이 Modified AFM 방법을 이용하여 격자선을 한 셀만큼 전진시키고 나면, 그 전 격자선의 굴곡이 새로운 격자선에도 전파되고, Fig. 2 에 예시된 것처럼 전진을 계속시킴에 따라 오목한 부분에서는 격자점들이 한곳으로 모이거나 서로 겹치게 되고 볼록한 부분에서는 격자점들이 서로 점점 멀어지게 됨으로써 격자의 질이 나빠지게 된다. 따라서 격자의 꼬임을 방지하고 격자를 매끄럽게 하여 격자의 질을 높이기 위하여 수정(corrector) 단계를 거치게 한다.

2.2 Corrector 단계

수정 단계에서는 새로이 얻어진 격자선의 굴곡이나 매끄럽지 못한 격자점 간격 등을 완화시키고 매끄럽게 하기 위하여 타원형 기법을 적용한다. 여기서 기존의 타원형 격자생성 기법과의 차이를 언급한다면, 기존의 방법은 전체 유동장에 대한 격자계에 대하여 타원형 미분방정식을 푸는 반면에, 본 수정 단계에서는 매 격자선에 대하여 국소적으로 타원형 방정식을 푼다는 것이다. 따라서, 본 기법은 전체적인 의미에서는 여전히 쌍곡형 기법과 마찬가지로 전진형 기법이 된다. 이때 사용하는 타원형 방정식은 라플라스 방정식이다. 2 차원 문제의 경우 라플라스 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nabla^2\xi = 0 \quad & or \quad \xi_{xx} + \xi_{yy} = 0 \\ \nabla^2\eta = 0 \quad & \qquad \eta_{xx} + \eta_{yy} = 0 \end{aligned} \qquad (4)$$

여기서, (x, y) 는 물리영역에서의 좌표값이고, (ξ, η) 는 계산영역에서의 좌표값이다. 이처럼 라플라스 방정식을 예측 격자선에 적용하여 풀기 위해서는 경계조건이 필요하므로 직전 격자선(previous grid line)을 예측 격자선(predicted grid line)에 대하여 대칭을 시킴으로써 경계조건으로 이용될 수 있는 보조 격자선(auxiliary grid line)을 구한다. 이때 보조 격자선은 단지 수정 단계에서 라플라스 방정식의 해를 구하기 위해서만 사용된다. Fig. 3(a)에 경계격자선과 예측 단계에서 얻어진 예측 격자선(predicted grid line)을 보여 주고 있고, Fig. 3(b)에서는 보조 격자선(auxiliary grid line)을 다른 두 격자선과 함께 보여 주고 있다. 라플라스 방정식의 해를 통해 얻어진 Fig. 3(c)의 수정 격자선(corrected grid line)은 훨씬 매끄러운 형태와 분포를 갖고 있다. 이와 같이 수정 단계가 끝나면 한 셀에 해당하는 격자선 전진이 이루어진 것이 되고, 전체 유동장이 사각형 셀들로 채워질 때까지 이와 같이 예측-수정 방법에 의한 격자선 전진이 반복이 된다. Fig. 3(d)에 본 기법에 의해 구해진, 겹침이 없는 격자계를 보여 주고 있다. 따라서, 본 기법은 국소적 의미로는 타원형 기법이면서 동시에 전체적 의미로는 전진형 기법이다.

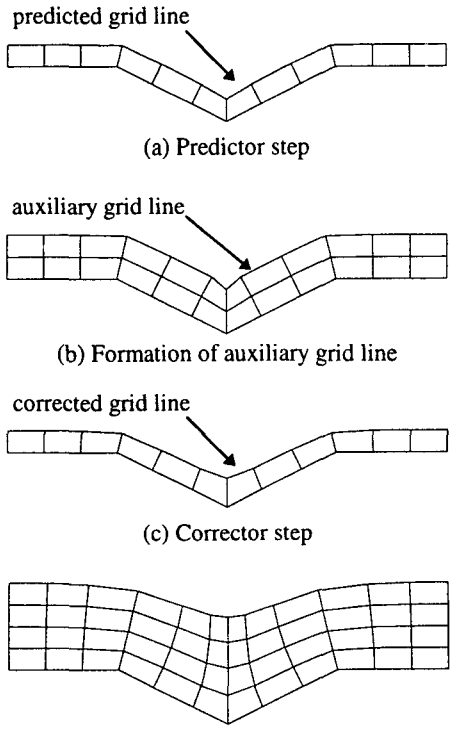


Fig. 3 Procedure of the present approach

지금까지의 설명은 주로 2차원 문제를 중심으로 하였으나, 3차원 문제에 대해서도 본 기법이 적용될 수 있고, 그 경우 지금까지 "격자선(grid line)"이라고 언급된 것 대신에 "격자면(grid surface)"으로 바뀐다고 생각하면 된다.

3. 격자 생성 예 및 토론

본 기법의 유용성을 살펴보기 위하여 Fig. 4에 보인 것과 같이, 3가지의 단순한 형상에 대하여 O-형 격자를 생성하여 보았다. 이러한 형상들은 단순한 기하학적 형상임에도 불구하고, 일반적인 쌍곡형 격자 생성 기법으로는 적절한 격자 생성이 용이치않은 문제점들을 갖고 있다. 이러한 형상들에 대하여 본 기법의 적용을 통하여 그러한 문제들이 해결될 수 있고, 또 적절한 격자를 생성할 수 있음을 보이고자 한다.

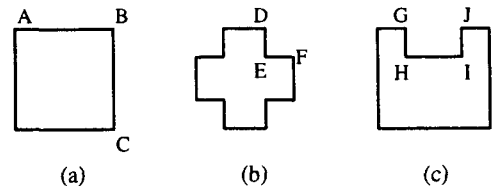
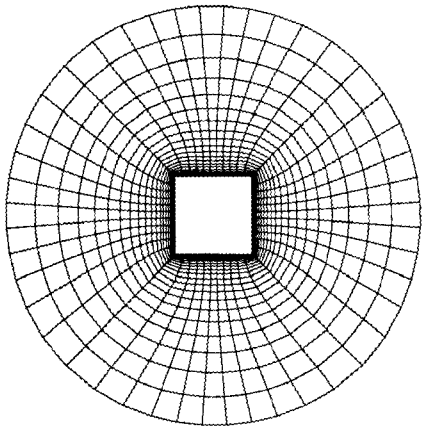


Fig. 4 Examples of simple configurations

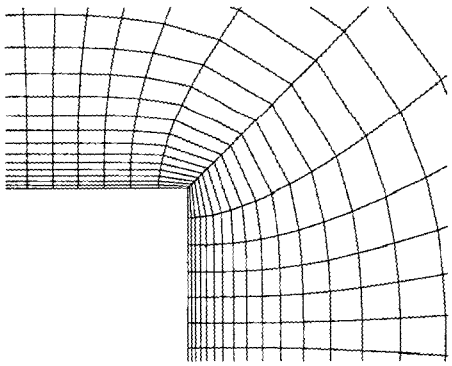
그 첫번째 예는 Fig. 4(a)와 같이 단순한 사각형 형상 주위에 O-형 격자 생성이다. 이 형상은 4개의 볼록한 코너(convex corners)를 갖고 있고, O-형 격자의 경우 형상의 접선 방향 격자선들은 이러한 꼭지점을 감싸며 돌아야하고, 이 때 형상 내부로 격자선이 침범하거나 격자선들이 서로 겹치지 않아야 한다. 또 다른 문제는 형상 선분 AB와 BC에 수직한 격자선들은 바깥으로 나아갈수록 격자 간격이 점점 벌어지게 되는데, 이러한 현상 또한 적절히 완화되어야 질 좋은 격자라 할 수 있다. 본 기법에 의한 격자를 Fig. 5에서 보이고 있는데, 격자가 전반적으로 매끄럽게 얻어짐을 알 수 있다. 더구나, 물체 표면 근처에서는 격자선이 표면에 수직성을 유지하고 있고, 코너 B의 좌우에서 표면에 수직한 격자선들이 외부 경계로 나아갈수록 서로 완만하게 격자간격이 유지됨을 보이고 있다. Fig. 5(b)에는 코너 B 근처의 격자를 확대하여 보여 주고 있다.

그 다음 형상은 Fig. 4(b)의 십자가 모양의 형상으로서, 볼록한 코너뿐 만이 아니라 4개의 오목한 코너(concave corners)들도 가지고 있다. 볼록한 코너 근처에서는 접선 방향 격자선들의 형상 침범이나 겹침이 주된 관심사임에 반하여, 오목한 코너 근처에서는 수직방향 격자선들의 겹침이 주된 관심사이다. 즉, 코너 E 근처에서 DE에 수직한 격자선들과 EF에 수직한 격자선들은 서로 겹치는 방향을 향하고 있기 때문에 격자선이 형상 표면에서 멀어질수록 적절히 서로의 방향이 완화되어 궁극적으로 모두 바깥방향을 향하도록 되어야 겹침이 없는 격자가 얻어지게 될 것이다. Fig. 6에 본 기법에 의하여 얻어진 O-형 격자를 보이고 있다. 코너 E 근처를 확대한 Fig. 6(b)로 부터 격자선들의 형상 표면에의 수직성과 겹침없는 격자선의 생성이 얻어지고 있

음을 확인할 수 있다.



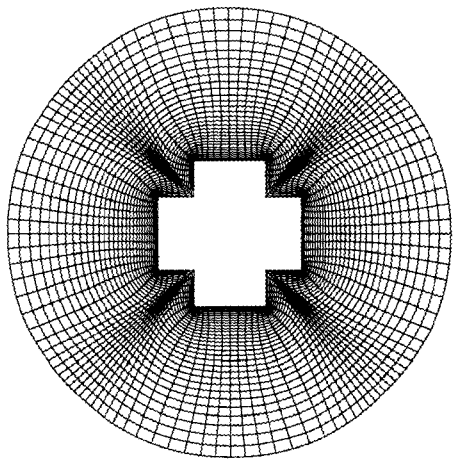
(a) Resultant grid



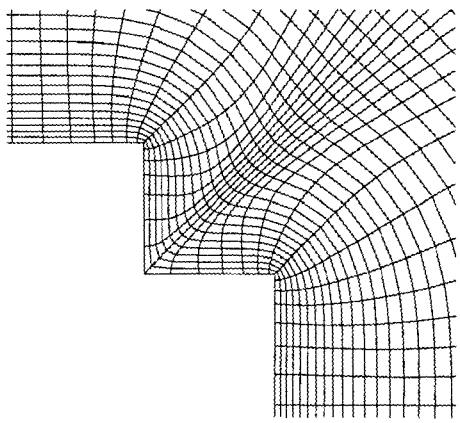
(b) Close-up view around the convex corner B

Fig. 5 O-type grid around a rectangular body

Fig. 4(c)의 세번째 형상은 앞의 두 경우, 즉 (a)와 (b),가 갖고 있는 볼록/오목한 코너들과 관련한 문제와 더불어, 형상의 서로 다른 부분에서 출발하는 수직 방향 격자선들이 서로 마주보고 전진하는 문제까지 포함된 형상이다. 즉, Fig. 4(c)에서 GH 선에 수직한 격자선들과 IJ 선에 수직한 격자선들이 서로 마주보고 전진하게 되고, 이에 더하여 HI 에 수직한 격자선들은 그들 사이를 비집고 들어가야 한다. 이 모든 문제점들이 격자선의 겹침없이(with no grid lines crossing), 형상표면 근처에서는 직교성(orthogonality around the body surface)을 유지하면서, 나아가 전체적으로는 매끄러운(globally smooth) 격자가 되도록 하면서 해결될 수 있다면 최선일 것이다. Fig. 7은 본 기법에 의한 격자가 위의 문제점들을 모두 해결하고 있다는 것을 보여주고 있다. Fig. 7(b)의 확대된 격자계로 부터 형상 표면 근처에서의 수직성 등을 확인할 수 있다.



(a) Resultant grid



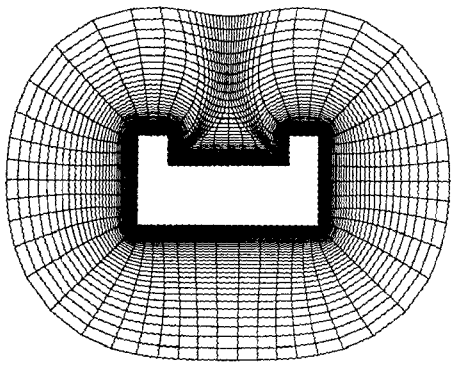
(b) Close-up view around the concave corner E

Fig. 6 O-type grid around a cross-shaped body

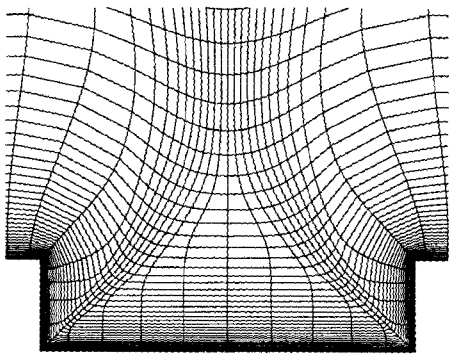
위의 세가지 예제들은 공기역학적인 측면보다는, 본 격자 생성 기법의 적용성(applicability)와 융통성(flexibility)를 확인하기 위하여 고려해 본 경우이다.

다음은 NACA 4412 익형 주위의 C-형 격자 생성의 예이다. 현재까지도 무한 유동장 내의 익형 주위 유동장 해석에는 Steger 등에 의해 제안되어 발전해오고 있는 쌍곡형 격자

생성 기법(hyperbolic grid generation method)이 가장 많이 사용되고 있다.[7]



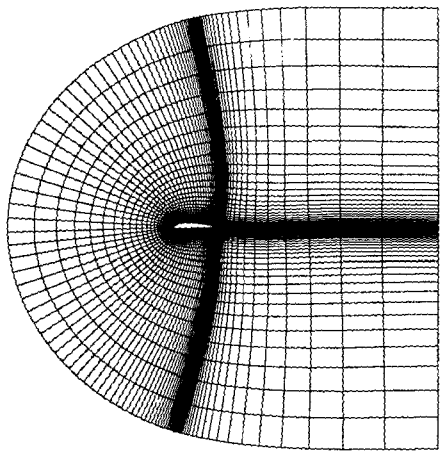
(a) Resultant grid



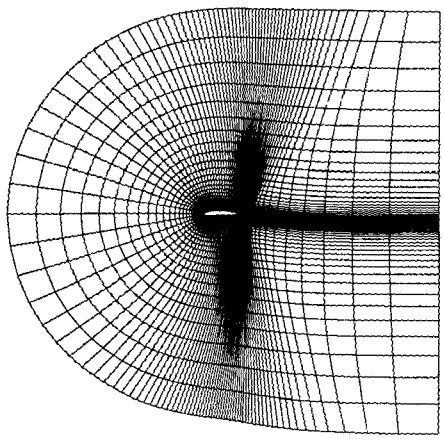
(b) Close-up view around the concave region GHIJ

Fig. 7 O-type grid around a body with a concave region

Fig. 8에서 쌍곡형 격자 생성 기법을 이용한 격자계(a)와 본 기법에 의한 격자계(b)를 보여주고 있다. 격자계(a)는 직교성이 격자 전체에 걸쳐서 유지되고 있음을 알 수 있다. 반면, 격자계(b)는 익형 표면과 후류선(wake cut)근처에서는 직교성이 유지되고, 바깥으로 나아갈수록 직교성은 완화되고 격자 간격의 균일성에 치중하고 있음을 알 수 있다. 이 두가지의 격자를 놓고 어느 격자가 우수한가를 따지는 것은 의미가 없을 것이다. 그것은, 계산격자가 그 자체로서 목적이 아니고 유동해를 좀더 정확히, 그리고 경제적으로 풀기 위한 도구이고, 따라서 서로 다른 격자들간의 우열은 대상 유동장의 수치해를 얻음으로써 비로소 비교될 수 있을 것이기 때문이다.



(a) Hyperbolic grid generation scheme



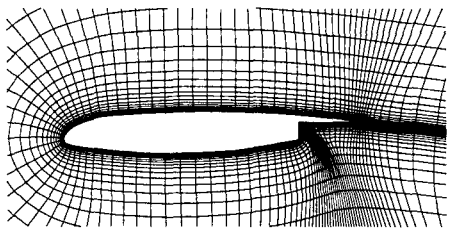
(b) Present MAP scheme

Fig. 8 Comparison between the hyperbolic scheme and the present MAP scheme

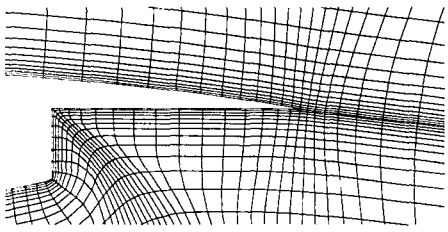
물론, 유동장의 해를 구하기 전이라도 격자의 질을 점검할 수 있는 기준으로 직교성(orthogonality), 매끄러움(smoothness), 밀집성(clustering), 그리고 격자 간격의 균일성(uniformness of spacing)등을 들 수 있다. 이러한 조건들 이전에, 우선 격자계가 적어도 사용 가능하기 위해서는 격자선의 겹침이 배제되어야 하는 것은 물론이다. 간혹 격자선의 겹침이 있는 격자를 확인없이 사용하여 유동

장을 풀려고 하는 경우가 있는데, 이 경우 유동해가 원하는 결과로 수렴하기를 기대하는 것은 헛수고일 것이다. 특히 타원형 기법에 의해 생성된 O-형 격자를 사용하여 익형 주위의 유동장을 해석할 때 예각을 지닌 뒷전(trailing edge) 근처에서 격자선의 익형 형상 침범이나 격자선 겹침이 종종 발견되곤 한다. 위에 나열한 질 좋은 격자의 조건들을 모두 동시에 만족시키는 격자의 생성은 불가능하다고 할 수 있다. 즉, 어떤 조건은 그것을 만족시키기 위해서는 다른 조건을 포기해야만 가능하기 때문이다. 따라서, 위에 열거된 조건들을 동시에 만족시키지는 못하더라도 한 유동장내에서도 부분별로 요구되는 조건이 다르다면 선별적으로 대상 조건을 만족시키는 격자를 생성하는 것이 차선책이 될 것이다. 이러한 관점에서 위의 각 조건들이 어떤 경우에 가장 많이 요구되는지를 따져보는 것은 중요하다 하겠다. 우선 직교성(orthogonality)은, 경계조건을 수치적으로 적용하거나 난류모델링을 적용함에 있어서 오차를 줄이거나 프로그래밍의 간편성 등을 위하여 유동장 경계, 특히 고체 벽면 근처에서 가장 많이 요구된다고 할 수 있다. 다음으로 매끄러움(smoothness)에 대해서 살펴보면, 어차피 대상 물체의 표면 형상에 굴곡이 있다면 그 굴곡이 유동장내로 어느 정도 전파될 것은 당연하다. 그러나 이 굴곡은 외부로 나아갈수록 완화되어야 전반적으로 매끄러운 격자를 얻을 수가 있게 된다. 따라서, 격자의 매끄러움은 형상 표면에서 멀어질수록 더욱 요구되는 조건이라 할 수 있다. 다음 조건인 격자의 밀집성(clustering)은 유동장내에 유동변수의 급격한 변화(예: 충격파)가 예상되는 부분에 격자가 조밀하게 분포되어야 하는 조건을 의미하는 것으로서, 이는 대부분의 경우 일단 유동장의 해가 얻어지고 나서야 가능한 것으로서, 이 조건의 만족을 위해서는 적응 격자 기법(grid adaptation method)등을 활용하여야 한다. 마지막 조건인 격자 간격의 균일성(uniformness of spacing)은, 유동장 경계를 따라 사용자가 미리 불균일한 계산점 분포를 주는 경우는 나름대로 필요한 곳에 격자를 조밀하게, 그리고 필요없는 곳에는 격자를 성기게 주었기 때문이고, 격자 생성의 결과로 얻어지는 최종 격자는 이러한 사용자의 의도가 충분히 반영되어 있어야 하기 때문에 격자의 균일성은 매끄러움과 마찬가지로 물체 표면 근처보다는 이로 부터 멀어질수록 더 많이 요구되는 조건이라고 하겠다.

이상과 같이 질 좋은 격자의 여러 조건들을 가장 많이 요구되는 곳에 선별적으로 만족시키는 것이 차선책이라고 본다면, Fig. 8(b)의 본 MAP 기법에 의한 격자는 물체 표면 근처에서의 직교성, 그리고 바깥으로 나아갈수록 매끄러움과 균일성을 이루고 있음을 보여주고 있다. 그리고, 본 예측-수정 사이클을 한 격자선 전진에 대해 1 회 이상 반복 적용함으로써 격자의 매끄러움과 균일성을 향상시킬 수도 있다.



(a) Resultant grid



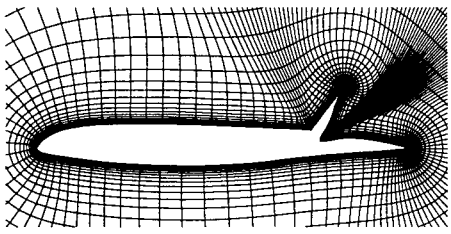
(b) Close-up view around the flap casing

Fig. 9 C-type grid about an airfoil with flap casing

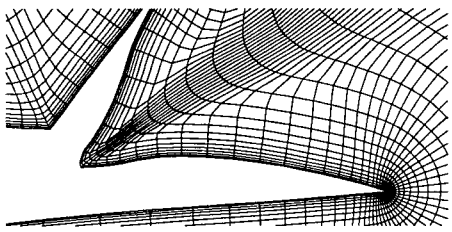
다음의 예로는 Fig.9 에서와 같이 플랩 장착부분을 단순화시킨 2 차원 익형주위의 C-형 격자이다. 기존의 쌍곡형 기법으로는 플랩 장착부의 오목한 코너 근처에서 겹침이 없는 격자의 생성이 어려운데 반해, 본 기법으로는 매끄러운 격자가 생성되고 있음을 보여주고 있다. 특히 본 기법의 특성상, 확대된 Fig. 9(b)에 보인 것처럼 익형근처에서는 격자선들이 표면에 거의 수직에 가까운 각도를 이루고 있고, 이는 추후 유동장 해석에서 경계

조건이나 난류 모델링 등의 적용에 있어서 오차를 최대한 줄일 수 있다는 장점을 의미한다.

마지막 예는, 비행기 착륙시 착륙거리를 줄이거나 비행중 빠른 감속을 위하여 사용하는 스포일러를 펼쳤을 때의 익형에 대하여 적용된 O-형 격자를 Fig. 10에서 보여주고 있다. 앞의 예와 문제의 성격상 큰 차이는 없지만, 격자선의 꼬임을 피해야 한다는 면에서는 더욱 어려운 문제인데도 본 기법은 스포일러의 힌지근처에서 매끄러운 격자를 생성하고 있음을 Fig. 10(b)에서 부터 알 수 있다.



(a) Resultant grid



(b) Close-up view around the spoiler hinge

Fig. 10 O-type grid about an airfoil with a spoiler

4. 결론

Modified AFM 방법을 예측 단계에서, 그리고 타원형 기법을 수정 단계에서 이용하는 predictor-corrector를 활용한 격자 생성 기법인 MAP scheme을 소개하였고, 이 기법을 여러 가지 2차원 형상에 대하여 외부 유동장 격자 생성에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

● 본 기법은 굴곡이 심한 형상에 대해서도 겹침이 없는 질 좋고 매끄러운 격자를 생성할 수 있다.

● 본 기법은 물체 표면 근처에서 유동해의 정확도를 최대화할 수 있도록 격자의 직교성을 최대한 보장한다.

● 본 기법을 외부 유동장에 적용할 때는 쌍곡형 기법처럼 물체 표면 경계를 따라서의 계산점 분포와 전진 방향의 격자 간격만을 필요로 하고 외부 경계의 형상은 격자 생성의 결과로서 얻어지게 된다.

● 본 기법은 쌍곡형 기법보다 상대적으로 격자 생성에 계산시간이 많이 드나, 쌍곡형 기법으로는 격자 생성이 불가능한 형상에 대해서도 질좋은 격자 생성을 가능케하는 장점을 지니고있다.

● 본 기법은 3차원 문제에 대해서도 손쉽게 적용 가능하다.

참고문헌

[1] J.F. Thompson, Z.U.A. Warsi, and C.W. Mastin, *Numerical Grid Generation - Foundations and Applications*, North-Holland, 1985

[2] J.L. Steger, "Generation of Three-Dimensional Body-Fitted Grids by Solving Hyperbolic Partial Differential Equations," *NASA TM 101069*, Jan., 1989

[3] J.Q. Cordova, "Advances in Hyperbolic Grid Generation," *4th International Symposium on Computational Fluid Dynamics*, Sep. 1991

[4] B. Kim, *Automatic Multi-Block Grid Generation about Complex Geometries*, University of Washington, Ph.D. Thesis, 1995

[5] 김 병수, "Predictor-Corrector를 활용한 격자 생성 기법," 제6차 유도 무기 기체/발사대분야 학술대회 논문집, pp. 3-10, Sep., 1996

[6] S.H. Lo, "A New Mesh Generation Scheme for Arbitrary Planar Domains," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 21, pp. 1403-1426, 1985

[7] J.L. Steger, and D.S. Chaussee, "Generation of Body Fitted Coordinates Using Hyperbolic Partial Differential Equations," SIAM J. Sci. Stat. Comput., Vol. 1, pp431-437, 1980