



## 자바 애플릿을 이용한 2차원 혼합형 비정렬 격자 생성 프로그램의 개발

이 장 훈,<sup>1</sup> 조 금 원,<sup>2</sup> 김 병 수<sup>\*3</sup>

### DEVELOPMENT OF 2-D UNSTRUCTURED HYBRID GRID GENERATION PROGRAM USING JAVA APPLLET

J.H. Lee,<sup>1</sup> K.W. Cho<sup>2</sup> and B.S. Kim<sup>\*3</sup>

*In this paper a hybrid grid generation program for general 2-D region is introduced. The program is developed by using JAVA programming language, and it can be used either as an application program on a local computer or as an applet in the network environment. The hybrid grid system for a 2-D problem means a combination of triangular cells and quadrilateral cells, and it can offer both of the high flexibility of triangular cells and the high accuracy and efficiency of structured-type quadrilateral cells. To accommodate a quadrilateral-cell region and a triangular-cell region into one computational domain, it is importance to take good care of the interface between two different regions so that overall good grid quality can be maintained. In this research advancing layer method(ALM) augmented by elliptic smoothing method is used for the quadrilateral-cell region and advancing front method(AFM) is used for the triangular-cell region. A special treatment technique for the interface between those two regions is also developed. The interface treatment technique is basically to prevent the propagation of small cell size due to ALM method into the triangular region and maintain the smooth transition of cell-size scale between two different regions. By applying current technique high-quality hybrid grids for general 2-D regions can be easily generated, and typical grid generation results and flow solutions are demonstrated.*

**Key Words :** 혼합 비정렬 격자(Hybrid Unstructured Grid), 자바 애플릿(JAVA Applet),  
프론트 전진 기법(Advancing Front Method, AFM), 레이어 전진 기법(Advancing Layer Method, ALM),  
타원형 격자 완화(Elliptic Grid Smoothing)

### 1. 서 론

전산유체역학이나 전산구조해석과 같이 수치해석 기법에 근거한 연속체 문제의 근사적 계산법은 경계를 포함한 계산 대상 영역을 유한한 숫자의 셀들로 구성된 계산 격자로 대체하게 된다. 이러한 격자계의 질과 사용하는 셀의 숫자 등이 수치 기법에 의한 근사해의 수렴성이나 정확도 등에 매우 커다란 영향을 미친다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 전산역학 분야에서 사용하는 격자계는 크게 정렬 격자계와 비정렬

격자계로 구분할 수 있다.

정렬 격자는 격자점들 간의 연결 정보가 규칙성을 갖고 있고, 2차원 문제의 정렬 격자 형상인 사각형 셀들은 커다란 가로세로비를 가지면서도 직교성을 유지하는 것이 가능하여 점성 경계층의 경우처럼 유동의 흐름 방향과 그 수직 방향의 유동 변수 기울기들이 큰 차이가 나는 경우의 계산에서도 적은 수의 셀을 사용하여 정확한 유동 계산을 할 수 있다는 큰 장점을 지니고 있는 반면, 복잡한 유동 영역에 대해서 전 영역을 정렬 격자로 채우기 위해서는 다중 블록을 이용해야만 하는 문제점과 함께 이러한 다중 블록의 구성 작업 등이 정렬 격자 생성 작업의 자동화 등에 장애물로 작용하는 등 엔지니어링 사이클의 단축에 있어서는 비정렬 격자에 비하여 단점이 있는 것 또한 사실이다[1].

비정렬 격자는 정렬 격자에 비하여 격자점들간의 규칙성을

1 학생회원, 충남대학교 대학원 항공우주공학과

2 정회원, KISTI Supercomputing Center

3 정회원, 충남대학교 항공우주공학과

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

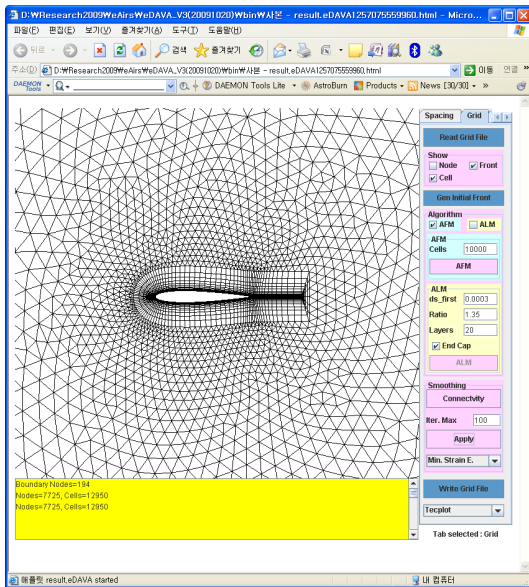


Fig. 1 Program running in the web browser.

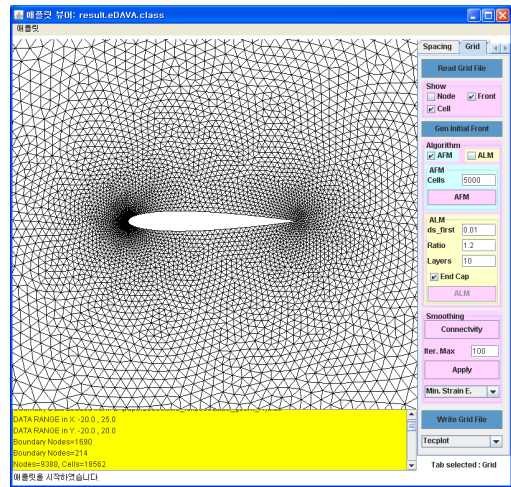
요구하지 않는 특징을 갖고 있어서 격자점 분포의 유연성이 매우 높고, 따라서 복잡한 형상의 물체 주위에 대한 격자 생성 작업을 상대적으로 용이하게 할 수 있고, 나아가 격자 생성 작업의 자동화에 있어서도 정렬 격자에 비해 구현 가능성이 훨씬 높다 하겠다.

본 논문에서는 물체 주위의 점성 유동 계산 등의 경우에 적절한 정렬 격자계와 다양한 형상의 계산 영역에 대한 격자 생성이 용이한 비정렬 격자계를 혼합하여, 물체 근처에는 정렬 격자계에 해당하는 사각형 격자계를 생성하고, 그 바깥쪽에는 비정렬 격자계를 생성함으로써 두 종류의 격자계가 제공하는 장점들을 최대한 활용할 수 있도록 혼합형 격자 생성을 편리하게 수행할 수 있는 자바 애플릿형 프로그램의 개발 결과와 현재까지 구현된 주요 기능 등을 소개하고자 한다.

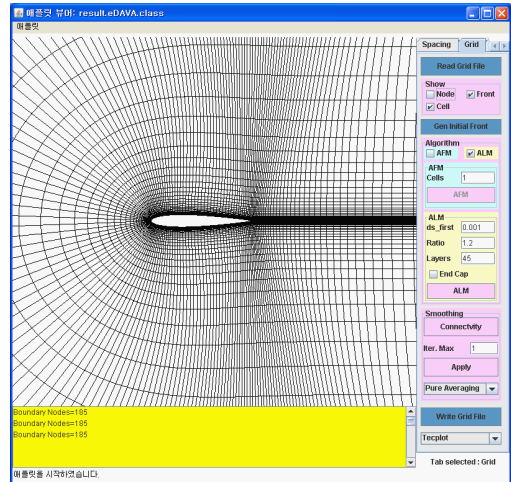
## 2. 혼합형 격자 생성 프로그램

### 2.1 프로그램 모드: 애플릿과 응용 프로그램

본 프로그램은 인터넷 상에서 서버에의 원격 접속을 통하여 격자 생성 작업을 할 수 있게 하기 위하여 JAVA 언어로 개발하였고, 그래픽 인터페이스(GUI)는 JAVA AWT 및 Swing component 등을 이용하여 구현하였다. 그래픽 처리는 OpenGL의 JAVA용 API인 JOGL 라이브러리를 이용하여 개발하였다 [2]. 실행 파일인 JAVA Applet은 로컬 컴퓨터상에서 응용 프로그램처럼 실행할 수도 있고, 또는 본 프로그램이 탑재된 서버에 인터넷으로 접속하여 웹 환경에서 실행할 수도 있다. 다



(a)



(b)

Fig. 2 Grid generated by AFM vs. ALM: (a) Triangular grids by AFM, (b) Quad grids by ALM.

음의 Fig. 1은 웹 브라우저 상에서 본 프로그램을 실행시킨 예를 보여주고 있다.

### 2.2 격자 생성 기법: AFM vs. ALM

본 격자 생성 프로그램이 제공하고자 하는 격자 생성 기능은 2차원 유동 해석 문제와 관련하여 일반적인 형상의 유동 영역을 전체적으로는 삼각형 비정렬 격자로 채워져 사용자의 선택에 따라서 점성 경계층 영역 등 필요한 곳에는 사각형 격자를 생성할 수 있도록 하는 것이다. 삼각형 비정렬 격자 생성 기법으로는 프론트 전진 기법(Advancing Front Method, AFM)을 사용한다[3]. AFM 기법은 유동장 경계상에 경계 노

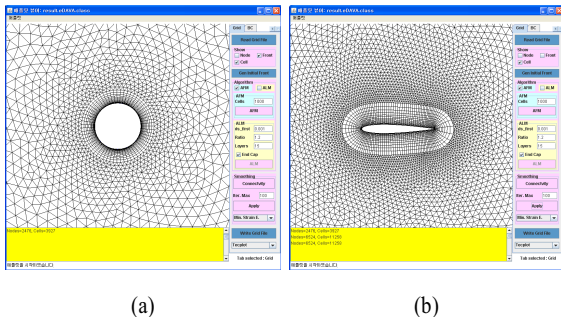


Fig. 3 Hybrid grid generation: (a) Circular body, (b) Airfoil.

드들을 우선 생성한 후, 경계 노드들을 연결하는 초기 프론트를 차례로 유동장 내부로 한 셀씩 전진시켜 나아가면서 전체 영역이 삼각형 격자로 채워질 때까지 격자 생성을 수행하는 방법이다.

한편, 사각형 격자 생성은 레이어 전진 기법(Advancing Layer Method, ALM)을 이용하였다[4]. 레이어 전진 기법은 개개의 셀을 하나씩 생성하는 대신에 선택된 대상 요소들을 한꺼번에 전진시킴으로써 사각형 셀들로 구성된 레이어들을 매 전진시마다 생성시키는 방법이다. 경계 형상의 굴곡 정도에 따라서 레이어의 전진에 따라 격자셀들간의 겹침이나 격자간격이 벌어지는 문제가 발생하므로, 이를 완화할 필요가 있다. 본 프로그램에서는 정렬 격자 생성 기법에서 격자 완화 기법으로 많이 이용하는 타원형 미분 방정식인 Laplace 방정식을 이용한 격자 완화 기법을 이용하여 레이어 전진시마다 격자 분포를 완화하는 기법을 사용하였다[5].

아래의 Fig. 2(a)는 AFM 기법만을 이용하여 2차원 익형 주위의 비정렬 삼각형 격자를 생성한 예를 보여주고 있고, Fig. 2(b)는 ALM 기법만을 이용하여 사각형 격자를 생성한 예를 보여주고 있다. Fig. 2(b)의 결과는 정렬 격자 생성의 경우와 동일한 결과임을 알 수 있고, 타원형 격자 완화 기법의 적용으로 인하여 매우 완만하고 양질의 격자 분포가 얻어지고 있음을 확인할 수 있다. 앞에서 설명한 AFM 기법과 ALM 기법을 적절히 혼합하여 격자 생성을 함으로써 사각형 격자의 장점인 점성 경계층에 대한 계산의 정확도를 높이면서 전체적으로는 격자 생성의 유연성을 높일 수 있는 삼각형 비정렬 격자를 혼합하여 활용할 수 있다. 즉, 물체 표면 근처에는 사각형 격자로 채우고, 그 이외의 영역에는 삼각형 격자로 채우는 혼합형 격자 생성을 활용함으로써 격자 생성의 편이성과 함께 유동체의 정확도 향상도 추구할 수 있도록 하는 것이다. 다음의 Fig. 3는 혼합형 격자를 적용한 예이다. 즉, Fig. 3(a)는 원형 물체 표면 근처에 사각형 격자를 생성하고 바깥 영역은 삼각형 격자로 채운 경우이고, Fig. 3(b)는 익형 주위에 O-type의 사각형 격자와 바깥쪽에 삼각형 격자를 생성한 경우이다.

### 2.3 Quad-Tri interface 처리 기법

익형 주위 유동 계산의 경우 O-type 격자는 뒷전 근처에서 격자의 왜곡이 커지는 문제점이 있으므로, 일반적으로 비점성 유동 계산에서는 큰 문제없이 활용할 수 있으나 점성 유동 계산의 경우 뒷전 근처에서의 격자 왜곡 문제를 해결하고 후류 계산의 정확도를 높이기 위해서 C-type 격자를 많이 사용한다. 즉, Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 점성 유동 계산을 위해서는 익형 근처와 후류 부분의 적절한 영역까지를 ALM 기법을 이용해서 C-type의 사각형 격자로 채우고 그 바깥쪽은 삼각형 비정렬 격자로 채우는 혼합형 격자 생성이 적절한 선택이 될 수 있다. 여기서 한 가지 문제점이 발생하는데, ALM 기법에 의한 레이어 전진시 격자선 전진 거리는 물체 표면에서의 점성 유동 계산에 적절하도록 간격을 고려하여 설정이 되는데 그 결과로 얻어진 사각형 격자가 바깥쪽 삼각형 격자 영역으로 연결되기 위해서는 후류 영역으로 지정된 사각형 격자의 끝 부분에서 격자 간격이 매우 작다는 것이다. 즉, Fig. 4(b)에 이 부분을 확대하여 보여 주고 있는데, 이 부분을 초기 프론트로 하여 AFM 기법에 의해서 삼각형 격자 생성을 수행하게 되면 Fig. 4(c)와 같이 후류 근처의 삼각형 격자가 매우 큰 가로세로비를 갖게 되고, 이는 격자 질을 저하시키는 직접적인 원인이 된다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로 Fig. 4(d)와 같이 삼각형 격자의 크기를 프론트의 크기에 따라 가변적으로 적용하는 방법이 있을 수 있으나, 이 경우 역시 사각형 격자 영역의 위와 아랫면에서의 격자 크기와 오른쪽 면에서의 격자 크기의 연속성이 깨짐으로써 발생하는 격자 질 저하는 여전히 해결되지 못하고, 더구나 후류 근처에 삼각형 셀들이 격자질 유지를 위해서는 매우 작은 셀 크기를 꽤 넓은 영역까지 유지해야 하므로 격자셀 수가 많아지는 문제점 또한 가지고 있다.

본 연구에서는 이처럼 ALM 기법에 의한 사각형 격자 영역과 AFM 기법에 의한 삼각형 격자 영역 사이, 즉 Tri-Quad interface 부분의 격자 크기의 원만한 전이를 위해서 사각형 격자 영역의 오른쪽 끝 부분에서 ALM 기법에 의한 사각형 격자들 중에서 작은 격자 간격이 삼각형 격자 영역으로 전과되지 않고 사각형 격자의 최외곽 경계가 AFM 기법에 의해서 생성될 삼각형 격자의 크기에 준하는 격자들만 노출이 되도록 자체 순환시키는 기법을 개발/적용하였다. 즉, Fig. 4(e)에서 보는 바와 같이 후류에 수직 방향으로 분포된 격자점들을 후류 윗 부분과 아랫 부분에 대칭적으로 놓인 쌍들끼리 연결시키고, 최외곽으로 노출되는 격자 분포는 사각형 격자 영역의 위와 아래 부분의 격자 크기에 준하는 크기가 되도록 한 층을 추가해 주는 것이다. 이 층을 접경 레이어(interface layer)라고 부른다면, 접경 레이어는 반드시 수직일 필요는 없고, 만일 사각형 영역의 수직 방향 거리가 외부 삼각형 영역의

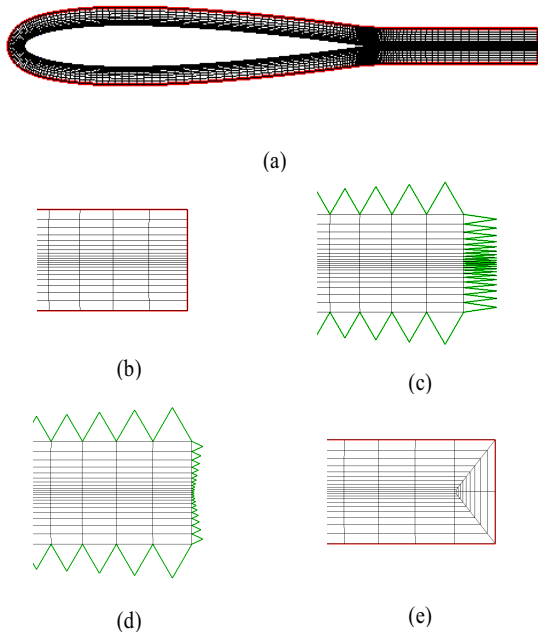


Fig. 4 Quad-Tri interface treatment: (a) Quad grids by ALM method, (b) Zoom-up view of the end of quad-cell region (c) Skewed triangular cells due to small node distances (d) Triangular cell size adaptation according to the node distance (e) Special treatment technique of quad-tri interface layer.

삼각형 격자셀 크기보다 작은 경우에는 그 크기가 확보되도록 비스듬한 방향으로 접경 레이어를 생성한다.

본 프로그램에서의 AFM 기법에 의한 삼각형 격자의 셀 크기 조절은 유동장에 분포시킨 격자 크기 조절 요소들과의 거리 역수에 근거하여 크기를 결정하는, 소위 근접도에 근거한 전역 내삽 기법에 의하여 이루어진다. 반면에, ALM 기법에 의한 격자 생성의 경우 물체 표면에서의 경계 노드는 앞에서 언급한 근접도에 근거한 전역 내삽 기법을 이용하여 분포시키되 점성 유동 계산에 적절한 물체 수직 방향의 첫 격자 간격과 바깥 방향으로의 격자 증분율에 근거하여 격자 간격을 조절한다[6,7].

앞에서 설명한 바와 같이 ALM 기법을 이용한 사각형 격자 생성 기법과 AFM 기법을 이용한 삼각형 격자 생성 기법을 활용하고, quad-tri interface layer 기법을 적용하여 사각형 형상의 외부 경계와 NACA 0012 익형으로 구성된 유동장에 대해서 혼합형 격자를 생성한 예를 Fig. 5에서 보여주고 있다.

Fig. 5(a)는 본 프로그램에 의해서 생성된 혼합형 격자의 전체적인 모양을 보여 주고 있고, Fig. 5(b)와 (c)는 익형 앞전 근처와 코드 중간 근처에서의 사각형 격자와 삼각형 격자의

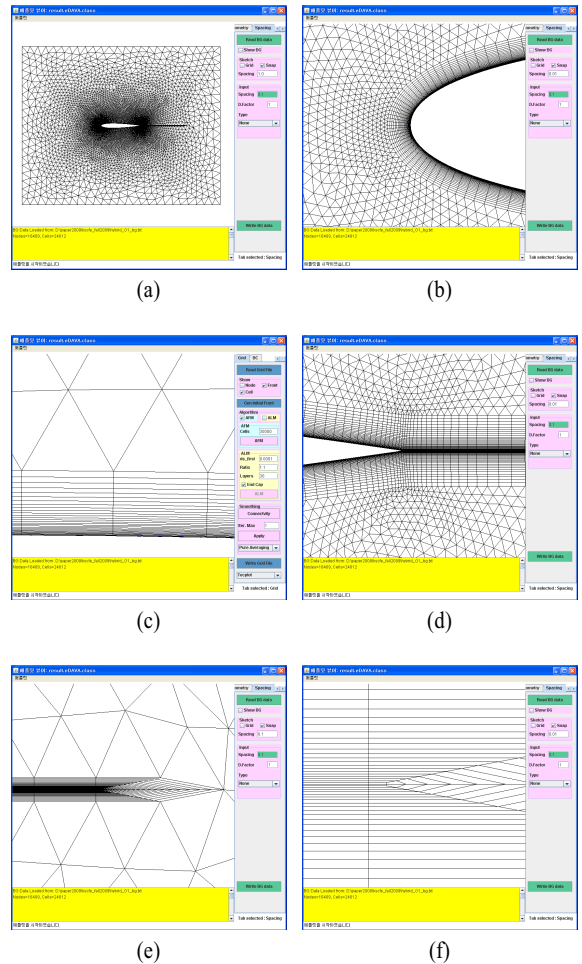
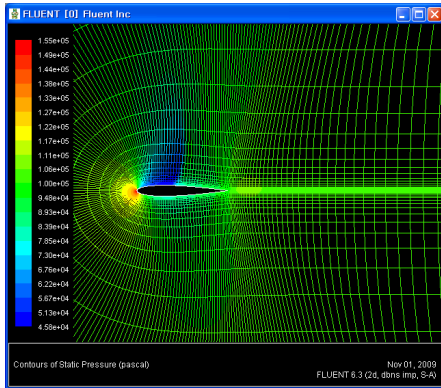


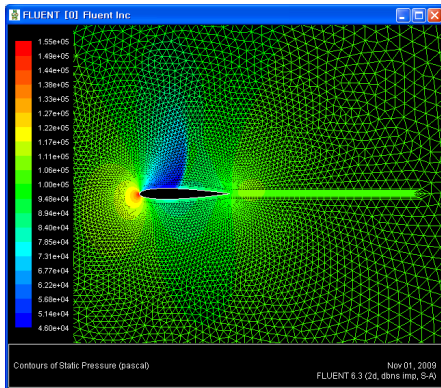
Fig. 5 An example of unstructured hybrid grid generation: (a) Overall grid structure, (b) Zoom-up view of the leading-edge region, (c) Mid-chord region, (d) Trailing-edge region, (e) Quad-tri interface layer, (f) Zoom-up view of interface layer.

접경 부근을 보여주고 있다. 서로 다른 형상의 격자셀들로서 셀 면적은 갑작스럽게 변하긴 하지만, 격자의 질이 우수하게 유지됨을 알 수 있다. Fig. 5(d)는 익형 뒷전 근처의 격자를 보여주고 있다. C-type 격자의 후류 계산에 적절한 특성과 함께 삼각형 격자로의 원만한 전이를 확인할 수 있다. Fig. 5(e)는 사각형셀 영역이 끝나는 부근을 보여 주고 있는데, 후류에 수직인 방향의 높이가 충분하지 않으므로 quad-tri interface layer가 사선 방향으로 생성되었음을 보여주고 있다. Fig. 5(f)에서는 interface layer를 확대하여 보여주고 있는데 개개의 셀들이 사각형 셀 형상을 유지하고 있음을 알 수 있다.





(a)



(b)

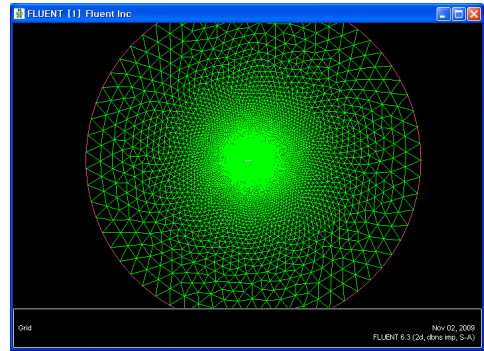
Fig. 6 Flow solutions using grid system generated by the current program: (a) Structured grid results, (b) Unstructured grid results.

### 3. 격자 생성 및 유동 계산에

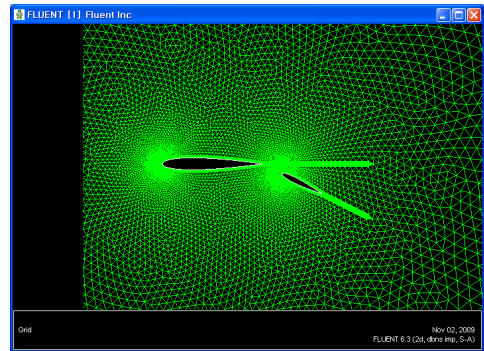
본 연구를 통하여 개발된 혼합형 격자 생성 프로그램을 이용하여 생성된 격자계를 유동장 해석 코드인 Fluent를 이용하여 유동해 계산에 직접 적용하였다. 계산 대상 유동 조건은 다음과 같다.

- 익형: NACA 0012 airfoil (코드 길이=1 m)
- Mach number = 0.8
- 받음각  $\alpha = 4^\circ$
- 레이놀즈수  $Re = 1.8 \times 10^7$
- Turbulence model: Spalart-Allmaras 1 eqn model
- Discretization scheme: 2nd Order Upwind
- Flux limiter: Roe FDS

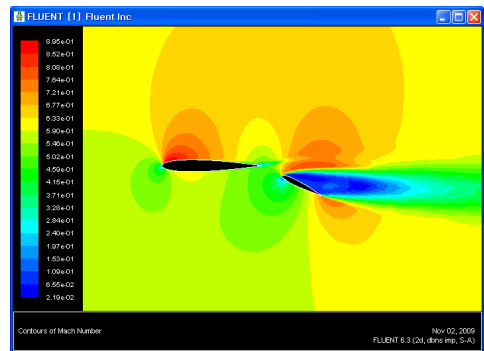
Fig. 6(a)는 전체 영역을 정렬 격자에 해당하는 사각형 격



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Flow solutions for multi-element airfoils: (a) Overall grid system, (b) Zoom-up view of hybrid grid system around the main airfoil and flap, (c) Resultant contours of Mach number distribution.

자로 생성하여 얻어진 유동장 계산 결과로서 격자계와 함께 압력 분포를 등압선 형태로 보여주고 있다. 본 혼합형 격자 생성 프로그램은 익형 주위 유동장 계산의 경우와 같이 필요할 경우 전 영역을 사각형 정렬 격자로 생성하는 것도 가능하다. 반면에, Fig. 6(b)는 익형 근처의 점성 경계층 부근과 후류 부분은 사각형 격자로 생성하고, 나머지 부분은 삼각형 격



자로 생성한 혼합형 격자계와 그를 이용한 유동 계산 결과를 함께 보여주고 있다. Fig. 6(a)와 (b)의 결과를 비교해 보면, 두 경우 모두 거의 구분이 가지 않는 비슷한 유동해를 보여주고 있음을 알 수 있다.

다음의 계산에는 Fig. 7에 나와 있는 것과 같이 NACA 0012 익형의 main airfoil과 flap으로 구성된 다중 익형의 경우로서, 형상 및 유동 조건은 다음과 같다.

- 주익형: NACA 0012 airfoil (코드 길이=1m)
- 플랩: NACA 0012 airfoil (코드 길이=0.447m)
  - 플랩 앞전 위치:  $(x,y) = (0.2, -0.1)$
  - 플랩 각도:  $\delta_{flap} = 26.6^\circ$
- Mach number = 0.6
- 받음각  $\alpha = 0^\circ$
- 레이놀즈수  $Re = 1.35 \times 10^7$
- Turbulence model: Spalart-Allmaras 1 eqn model
- Discretization scheme: 2nd Order Upwind
- Flux limiter: Roe FDS

Fig. 7(a)에서는 본 계산에 사용된 격자계의 전체적인 모습을 보여주고 있는데, 유동장 바깥 경계는 주익형의 약 20배 (20m) 바깥쪽에 원형으로 원방 경계 설정을 하였고 계산에 사용된 격자계의 노드수는 약 15,000개 그리고 셀은 약 26,000개(삼각형 및 사각형 셀)로 구성되었다. Fig. 7(b)에서는 주익형과 플랩 주위에 점성 계산을 위하여 생성된 C-type 사각형 격자계와 사각형 격자계가 끝나는 오른쪽 끝부분의 interface layer와 함께 사각형 격자 영역 주변을 채우고 있는 삼각형 셀들로 구성된 혼합형 격자계를 보여주고 있다.

Fig. 6와 Fig. 7의 계산예에서 확인할 수 있듯이 본 혼합형 격자 생성 프로그램을 활용하여 복잡한 형상의 유동 문제에 대한 격자 생성을 매우 편리하게 할 수 있음을 확인할 수 있다. 더구나, 단순 익형의 경우 정렬 격자 생성에 해당하는 사각형 격자계를 쌍곡형 격자 생성 기법에 준하여 생성할 수도 있음을 알 수 있고, 다중 익형의 경우와 같이 복잡한 형상에 대해서는 혼합형 격자계를 활용함으로써 사각형 격자의 정확도와 삼각형 격자의 유연성의 장점을 고루 활용할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 일반적인 형상의 2차원 유동장에 대해서 사각형 셀과 삼각형 셀로 구성된 혼합형 격자계를 생성할 수

있는 비정렬 격자 생성 프로그램의 개발과 그 주요 기능에 대해서 소개하였다. 본 프로그램은 JAVA 언어를 이용하여 프로그래밍 되었으므로 로컬 컴퓨터상에서 응용 프로그램처럼 실행할 수도 있고, 또는 웹상에서 본 프로그램이 탑재된 서버에 접속하여 자바 애플릿으로 실행할 수도 있다. 사각형 격자 생성은 타원형 격자 완화 기법이 적용된 레이어 진입 기법을 사용하고, 삼각형 격자 생성은 프론트 진입 기법을 채택하고 있다. 사각형 셀 영역과 삼각형 셀 영역의 접경 부근에서의 격자 질을 유지하기 위하여 접경 레이어 기법을 도입하여 격자셀 크기의 전이가 원만하게 이루어지도록 하는 기법을 개발하고 적용하였다. 본 프로그램을 이용하여 생성된 혼합형 격자계를 유동장 계산에 적용한 결과 정확한 유동해를 얻을 수 있음을 확인하였고, 무엇보다도 격자 생성에 소요되는 시간을 대폭 단축할 수 있음을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 KISTI의 e-Science 연구과제의 일부이며, 과제를 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 2001, Blacker, T., "Automated Conformal Hexahedral Meshing Constraints, Challenges and Opportunities," *Engineering with Computers*, Vol.17, pp.201-210.
- [2] <http://jogl.dev.java.net/>
- [3] 1993, Pizadeh, S., "Structured Background Grids for Generation of Unstructured Grids by Advancing-Front Method," *AIAA Journal*, Vol.31, No.2, pp.257-265.
- [4] 1996, Pizadeh, S., "Three-Dimensional Unstructured Viscous Grids by the Advancing-Layers Method," *AIAA Journal*, Vol.34, No.1, pp.43-49.
- [5] 1994, Kim, B., "Automatic Multi-Block Grid Generation about Complex Geometries," *Ph.D. Thesis*, University of Washington.
- [6] 2007, 이봉주, 김병수, "CAD 형상 데이터를 이용한 비정렬 표면 격자계의 자동 생성 기법," *한국전산유체공학회지*, 제12권, 제4호, pp.68-73.
- [7] 2008, Lee, B. and Kim, B., "ALM 방법에 의한 비정렬 점성 격자의 유화 기법," *Proceedings of The 5th National Congress on Fluids Engineering*, Jeju, Korea.