

문제-지향적 교육용 격자 생성 프로그램의 개발

류 기 명, 김 병 수*

충남대학교 항공우주공학과

DEVELOPMENT OF PROBLEM-SPECIFIC GRID GENERATION PROGRAM FOR EDUCATIONAL PURPOSE

G.M. Ryu and Byoungsoo Kim*

Dept. of Aerospace Engineering, Chungnam National Univ.

A grid generation program for specific problems is introduced. The program allows users to easily generate grid system for specific geometry such as an airfoil, cylinder, wedge, flat plate, and nozzle. Generating grid system for those problems can be proceeded with minimum user inputs such as geometry-defining parameters and grid-defining parameters. By using this program learning stage for preprocessing of CFD application can be efficiently shorten and novice students can learn and acquire experience by trying out grid generation and CFD solution by themselves.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 자바 애플릿(Java Applet), 격자 생성(Grid Generation), 문제 지향적(Problem-Specific)

1. 서 론

본 논문에서는 전산유체역학에서 해석을 위한 격자 생성 작업의 일환으로 로컬에서는 물론 웹상에서도 수행할 수 있는 자바 언어로 개발된 격자 생성 프로그램의 기능과 관련 알고리즘에 대해 설명하고자 한다. 최근 기술 개발의 발전과 더불어 컴퓨터의 성능이 향상됨에 따라 전산 수치 해석 분야의 기술이 매우 발전하였으며 컴퓨터를 통한 해석이 각광을 받고 있고 실제 연구소와 많은 기업에서는 전산 수치 해석을 통한 연구를 진행하고 있다. 이는 대학, 대학원 등과 같은 고등 교육기관에서 이론 중심의 강의를 통해 들었던 유체 역학 분야의 내용을 CFD의 해석을 통한 구체적인 수업 내용의 학습과 수치 해석 기법을 이용한 다양한 물리 현상의 이해에 도움을 줄 수 있다. 하지만 다양한 상용 SW의 개발에도 불구하고 사용법이 익숙하지 않음에서 오는 조작의 어려움과 관련 이론에 대한 이해 부족으로 학생들이 바로 사용하기에는 많은 어려움이 있다.

전산유체역학에서 수치해석 계산법은 경계를 포함한 계산

대상 영역을 유한한 숫자의 셀들로 구성된 계산 격자로 대체하게 된다. 이러한 격자계의 질과 셀들의 숫자 등이 수치 기법의 근사해의 수렴성이나 정확도 등에 매우 커다란 영향을 미치게 된다. 이처럼 전처리의 격자 생성의 기능은 해석에 매우 중요한 영향을 주고 격자의 신뢰성에 많은 영향을 미치기 때문에 처음 접하는 사용자에게는 격자의 이해와 격자 생성에 대한 간략한 사용 방법이 무엇보다 중요하다고 할 수 있겠다.

본 연구에서는 교과 과정에서 접하게 되는 이론적인 학습 내용의 이해도를 높이고 다양한 전산유체역학을 통한 해석을 쉽게 진행할 수 있도록 특화용 격자 생성 프로그램을 개발하였다. 이는 에어포일, 실린더, 썰기, 평판 그리고 노즐과 같은 특정 문제에 대하여 사용자의 입력 작업을 최소화 하면서 최적의 격자를 생성하는 프로그램으로서 처음 CFD를 접하는 학생들도 유동의 해석을 진행하거나 전산수치해석의 일련의 과정을 쉽게 수행할 수 있다. 이를 전처리 과정에서 구현하였으며 실험실에서 그동안 개발하고 그 기능을 확대하고 있는 자바 애플릿형 격자 생성 프로그램에 적용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 프로그램의 환경

본 프로그램은 JAVA로 작성된 프로그램으로서, 웹상에서

Received: November 26, 2014, Revised: March 23, 2015,
Accepted: March 23, 2015.

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

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2015.20.1.026>

© KSCFE 2015

사용자가 서버에 원격 접속하여 애플릿(Applet)으로 격자 생성 작업을 할 수도 있고, 개인 컴퓨터에 실행 버전을 설치해 놓고 사용할 수도 있다. 그래픽 인터페이스(GUI)는 JAVA AWT 및 Swing component 등을 이용하여 구현하였고, 그래픽 처리는 OpenGL의 JAVA용 API인 JOGL 라이브러리를 이용하여 개발하였다.

2.2 격자 생성 기법

2.2.1 정렬 격자 생성

격자 생성은 유동 내부에 구하고 싶은 해의 위치를 정의하는 절차이다. 이때 공학문제에서는 직교 형태의 물체보다는 다양한 일반적인 형상의 문제가 대부분이다. 이런 형상을 직교 좌표(cartesian 좌표)로 격자를 생성할 경우 경계조건 적용이 힘들 뿐 아니라, 많은 오차를 낳게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 격자 생성을 한 후, 직교(cartesian)좌표계에서 일반 곡선 좌표(generalized curvilinear coordinate system)로 변환을 하여 계산한 후, 다시 직교 좌표계로 역 좌표 변환을 하여야 한다. 이 과정에서 지배방정식, 격자점의 좌표, 경계 초기 조건 등 모두 변환이 이루어져야 한다. 이때 격자 생성은 물리 영역(physical domain)에서 격자점들을 계산 영역(computational domain)으로 사상(mapping)하는 변환 함수(transformation function)를 결정하게 되는데 여러 조건을 만족하여야 한다. 격자선이 꼬이지 않도록 사상(mapping)은 반드시 1:1이 되어야 하며, 격자선들은 좌표변환의 미분값들이 연속적이 되도록 매끄러워야 하고, 물리 영역(physical domain)에서 급격한 유동함수의 구배가 일어나는 지역에서 격자선들이 충분히 밀집하면서 격자의 가로세로비(aspect ratio)가 너무 크지 않도록 해야 하는 등의 조건이 있겠다. 이러한 조건을 만족하면서 정렬 격자를 생성하기 위해서는 다양한 방법이 있는데 그중 대표적으로 등각 사상법(conformal mapping), 대수적 기법(algebraic method), 그리고 편미분 기법(PDE method)이 있다. 등각 사상법의 경우 변환 관계식이 해석적인 함수식으로 얻어져 변환 방정식의 차별화 과정에서 오차를 최소화할 수 있으나 제한적인 형상에서만 가능하고, 대수형 기법은 경계점을 따라 격자점 분포가 주어지면 이를 통해 내부의 격자점 분포를 내삽 하여 결정하는 방법으로 사용되는데 수적으로는 대수적 관계식으로 적은 시간 내에 계산이 가능하나 바깥 경계를 따라 격자점의 분포가 불연속적이면 그 영향이 내부 격자점까지 영향을 미치게 된다. 편미분 기법은 격자 분포를 편미분 방정식의 해를 통해 구해내는 기법으로서 해를 구하는 대상 편미분방정식의 특성에 따라 타원형(elliptic), 쌍곡형(hyperbolic), 그리고 포물형(parabolic)으로 나뉘어진다.

본 논문에서는 격자를 생성하는 방식으로 Modified AFM (Modified Advancing Front Method)와 편미분 방정식의 타원형

기법을 이용한다. 일반적인 쌍곡형 격자생성기법에서 초기 조건에 해당하는 물체의 형상이 심한 굴곡과 오목함을 가질 때 격자선들이 서로 중첩되거나 꼬이는 현상 등의 단점을 보완하기 위하여 두 기법을 혼용하여 사용하였다. Modified AFM 기법은 기존의 AFM(Advancing Front Method)의 기하학적 수직 백터와 격자 간격을 이용하여 1 cell 씩 전진하여 나가는 것에서 확장 시킨 1층씩 격자선을 전진해 나가는 기법이다. 기존의 쌍곡선 기법에 비해 수학적으로 간단하며 전진 방향에 대한 유연함을 장점으로 가진다. 격자 선들의 완화 작업으로는 타원형 미분 방정식인 라플라스 방정식을 이용하여 격자점의 위치를 조정하게 된다[1].

2.2.2 Modified AFM(Modified Advancing Front Method)

기존의 Advancing Front Method(AFM)는 주어진 경계 형상에 따라 분포된 격자점들을 한 cell씩 전진시킴으로써 대상 유동장을 삼각형 격자셀로 채워 넣는 비정렬 격자 생성 기법이다. Modified AFM 기법은 AFM의 전진기법을 활용하면서 경계 형상을 따라 분포된 격자점들을 각각 동시에 전진을 시킴으로써 격자를 생성하고 새로운 격자선을 찾아내는 기법이다.

전진방향은 백터로 표시될 수 있으며 이때 수직인 백터는 격자의 질을 향상시킬 수 있고, 이러한 수직 백터는 대상 격자점의 기하학적 정보만으로 쉽게 구할 수 있다.

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

여기서 I 는 주변 격자점의 개수이고, \vec{v}_i 는 주변 격자점까지의 백터이다. 다음으로는 격자의 질을 좋게 해주는 격자선의 직교성을 이용하여 수직백터를 전진백터로 이용하게 된다.

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

위와 같이 전진 백터 $\vec{V}_{advance}$ 가 구해지면 격자선상의 각 격자점을 전진시켜 새로운 격자점 \vec{X}_{new} 을 구한다.

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

$d_{advance}$ 는 전진 간격으로 사용자에게 의해 미리 정해지거나 혹은 격자선 끝점에서 주어진 격자 간격에 의해 결정되기도 한다. 하지만 이처럼 한 셀씩 전진시키고 나면 직전 격자선의 굴곡이 새로운 격자선에 전달되어 오목한 부분에서 격자점들

Airfoil Geometry		Marching(Hyper.)	
<input type="checkbox"/> DB File	READ	dy at wall	1.0E-4
Airfoil NACA	0012	Growth Ratio	1.233
Chord Length	1.0	Jmax	51
Grid Type		Outer Distance	15.0
<input checked="" type="checkbox"/> C-type	<input type="checkbox"/> O-type	Chordwise	
Wake Length	5.0	dx_LE	0.0010
Apply	Close	dx_TE	0.0050
<<Basic		dx_WakeEnd	0.0
		l_lower	41
		l_upper	41
		l_wake	31

Fig. 1 Input parameter

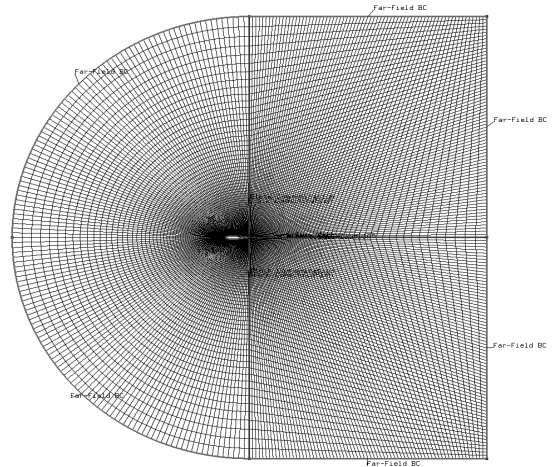


Fig. 2 Airfoil

이 한곳에 모이거나 겹치는 현상이 발생하게 된다. 이렇게 격자가 꼬이면서 질이 나빠지게 되는 현상을 매끄럽게 수정하는 작업이 이루어져야 한다.

2.2.3 타원형 편미분 기법(Elliptic PDE method)

위와 같은 매끄럽지 못한 격자점 간격 등을 완화 시키는 방법으로 타원형 기법(elliptic)을 적용한다. 타원형 기법은 타원형 편미분 방정식의 해를 구함으로써 경계 분포를 만족하면서 타원형 편미분 방정식의 해의 특성상 원만한 분포라는 장점을 가지고 있다. 타원형 기법은 모든 바깥 경계에서 경계 조건이 주어지야만 하는 내부 유동장의 격자 생성에 적절하지만 외부 유동장의 경우 바깥 경계가 미리 정해지고 경계점 분포 또한 주어진다면 적용이 가능하다. 여기서는 유동장 전체의 격자계에 타원형 기법을 사용하는 것이 아니라 부분적으로 전진형 격자 생성에 대해 타원형 방정식을 풀게 된다. 이때 사용되는 타원형 방정식은 라플라스 방정식으로 다음과 같다.

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

여기서 x, y 는 물리 영역에서의 좌표값이고, ξ, η 는 계산 영역에서의 좌표 값이다. 라플라스 방정식을 새로운 격자선에 적용하여 풀기 위해서는 경계조건이 필요하게 되는데 직선의 격자선을 새로 생성되는 격자선에 대하여 대칭을 시킴으로써 경계조건으로 이용될 수 있는 보조 격자선을 구한다. 이때 사용되는 보조 격자선은 수정 단계에서 라플라스 방정식의 해를 구하기 위해서만 사용된다. 이 과정을 통해 격자선은 훨씬 매끄러워진다.

3. 특화 격자 생성 프로그램 개발

본 특화 격자 생성프로그램을 사용하여 2차원 유동장에 대한 특정(에어포일, 실린더, 썰기, 평판, 노즐)형상의 격자를 생성할 수 있다. 각 형상들에 대해 Modified AFM과 타원형 PDE기법을 이용하여 격자를 생성하게 되며, 시위 길이(chord length), 후류 길이(wake length), $y+$ 등의 간단한 입력을 통해 사용자는 쉽고 빠르게 완성된 격자를 받아볼 수 있다. 다음은 에어포일 형상에 한정된 격자 생성 프로그램인 qFoil의 형상 매개변수(parameter) 입력 창을 보여주고 있다. Fig. 1에서 보는 것과 같이 외부에서 점 데이터(point data)를 불러들이거나 내부 수식 알고리즘을 통해 NACA 에어포일의 형상을 생성하여 시위 길이(chord length), 격자 타입(C, O 타입), 바깥 방향으로의 첫 격자 간격, 증가율, J 방향으로의 개수, 그리고 원 방 경계까지의 거리를 선택할 수 있으며, 격자 사이의 조밀도와 간격 조절을 위해 필요한 값들을 입력할 수 있다.

3.1 에어포일(Airfoil)

내장되어 있는 함수 식 혹은 외부에서 점 데이터를 이용하여 스플라인(spline)을 통한 에어포일(airfoil) 형상을 제작하고, 두께와 챔버의 변화에 따른 특성을 파악하는 문제를 통해 Fig. 2와 같이 격자를 생성하여 받음각에 대한 양항력 곡선의 분포가 어떻게 변화 하는지에 관한 문제를 풀 수 있다.

3.2 실린더(Cylinder)

레이놀즈수에 따른 실린더 주위의 유동 해석을 위해 실린더의 크기와 형태의 변화를 주어 형상을 제작하고, 정상상태

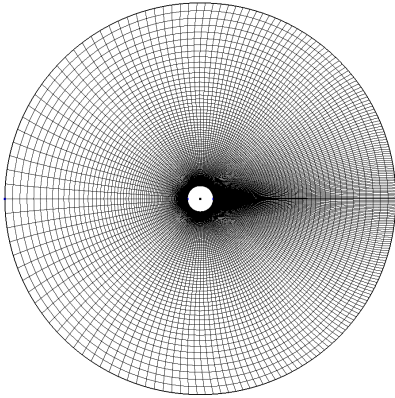


Fig. 3 Cylinder

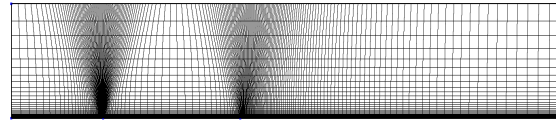


Fig. 5 Plate

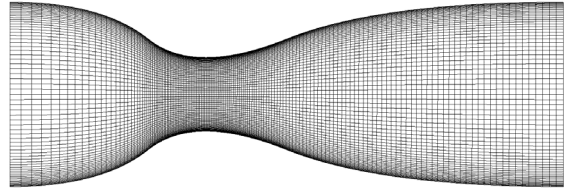


Fig. 6 Nozzle

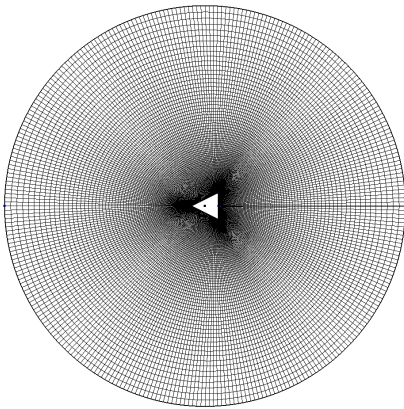


Fig. 4 Wedge

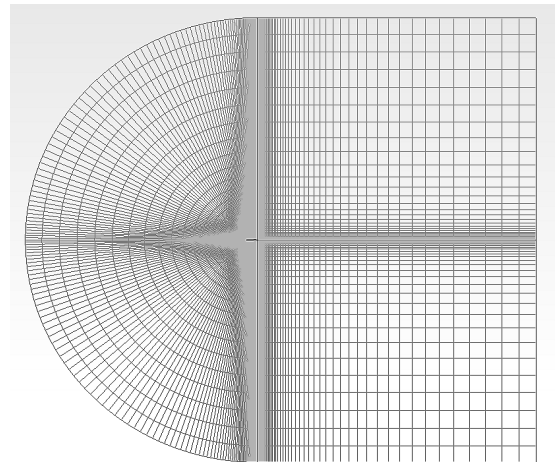


Fig. 7 C-type grid shape(Pointwise)

에서 비점성유동(베르누이 Eqn.)과 점성유동의 비교를 알아보는 문제로 물체 표면에서의 압력 분포의 차이와 박리의 발생, 후류 생성 확인 문제를 Fig. 3의 격자를 통해 풀 수 있다.

3.3 썰기(Wedge)

초고속 유동에서 비행체 선두부의 형상(썰기)에 따라 발생하는 충격파와 비행체에 가해지는 열량이 달라지는데 이때 두 형상의 차이를 통해 발생하는 충격파의 크기와 공기와 비행체에 가열된 열량을 비교하는 문제로 Fig. 4의 격자를 통해 풀 수 있다[2].

3.4 평판(Flat plate)

평판 유동에서 층류 유동의 경계층이 형성되는데 격자의 조밀도 및 질에 따른 경계층의 형상과 Blasius solution에 의한 값의 비교와 경계층 두께를 찾아 운동량 두께를 구하고 이를

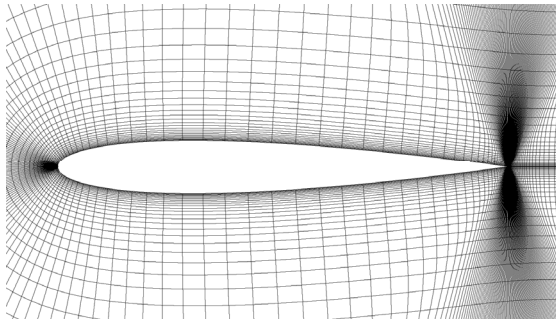
통한 레이놀즈수를 구한 다음 층류와 난류 여부의 판단 문제를 Fig. 5의 격자를 통해 풀 수 있다.

3.5 노즐(Nozzle)

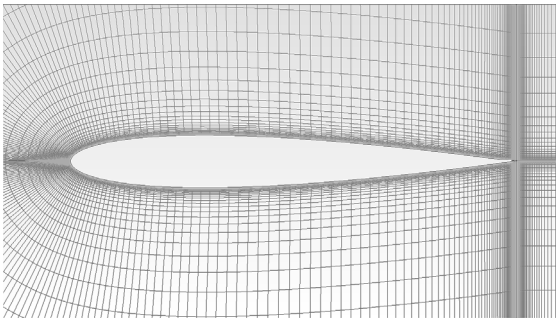
배기 노즐에서 노즐의 최대 축소 및 확대각과 목 면적, 출구 면적 값을 바꾸어 가면서 추력 분포의 해석에 적용할 수 있고, 로켓의 노즐 형상 설계에서 원추형의 노즐의 부분 형상을 벨 형으로 변화시킴으로써 추력의 변화를 Fig. 6의 격자를 통해 해석해볼 수 있다[3].

3.6 적용 예 : Airfoil 해석

2D NACA0012 airfoil의 격자 생성을 통해 실제 실험 데이터[4]와 벽면 근처에서 더욱 세밀한 격자 간격과 직교성을 가진 다른 수치해석 결과와 비교해 보았다. 격자 생성은 Fig. 7



(a) qFoil



(b) Pointwise

Fig. 8 NACA0012 grid comparison between qFoil and Pointwise

에서와 같이 상용 SW인 Pointwise를 이용하였으며 Table 1 에서와 같이 최외각까지의 거리는 시위 길이(chord length)의 20 배로, 에어포일(Airfoil)의 날개 뒷전(trailing edge)에서는 격자의 간격을 밀집하여 격자의 개수를 충분히 많도록 생성하였다. Fig. 8에서는 qFoil과 Pointwise로 생성된 격자의 모습을 보여주고 있다. 해석자로는 Table 2와 같이 상용 SW인 FLUENT를 이용하여 진행하였으며 해석 조건으로는 실험 데이터의 조건을 바탕으로 Mach number 0.15와 Re 3,990,000의 유동 조건으로 진행하였다. 받음각은 -4° 에서부터 19° 까지 실험 데이터의 값과 같은 $1 \sim 2^\circ$ 간격으로 해석하였으며, 난류 모델 $k-\omega$ SST를 사용하였다.

해석된 결과로는 Fig. 9과 Fig. 10에서 보는 것과 같이 Pointwise를 통해 생성한 격자와 특화용 격자 생성 프로그램

Table 1 Grid system

Program	qFoil	Pointwise
Chord length	1	1
X range	-14 ~ 15	-19 ~ 25
Y range	-20 ~ 20	-20 ~ 20
y+	14	< 1
Total cell	20,000	35,000

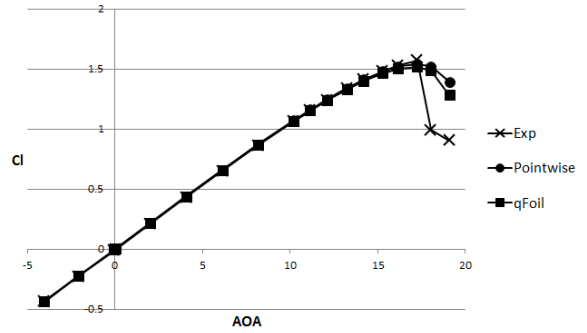


Fig. 9 NACA0012 Lift coefficient comparison

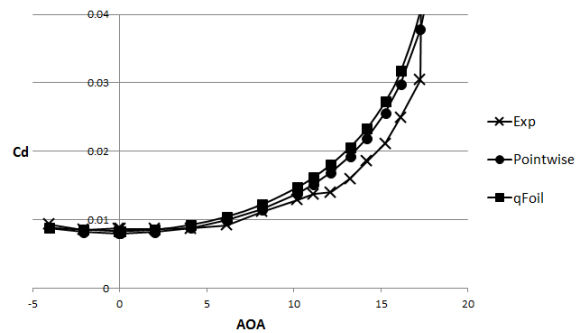


Fig. 10 NACA0012 Drag coefficient comparison

인 qFoil로 생성한 격자의 해석 결과가 받음각에 따른 C_l , C_d 에서 비슷한 경향성을 가지면서 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있었다. qFoil에서 간단한 매개변수(parameter)의 입력을 통해 다소 조밀하지 못하거나 충분한 개수를 가지지 못한 격자를 통해 해석된 결과임에도 불구하고 사용자들에겐 좀 더 쉽고 빠르게 해석을 할 수 있고, 또한 특정 문제에 대한 설정만을 고려할 수 있기 때문에 상용 SW에서와 같이 사용하지 않는 복잡한 세부 설정들을 고려하지 않아도 된다는 점에서 매우 유용하다 할 수 있다. 하지만 아직 세부적인 입력 변수의 지정과 경계조건 지정 문제 등의 작업이 남아있어 추후 기능을

Table 2 Solver setting

Code	FLUENT ver. 15.0
Mach number	0.15
Reynolds number	3,990,000
Type	Pressure-based
Time	Steady
Viscous model	$k-\omega$ SST
Discretization scheme	QUICK

보완하고 개선해가면 사용자가 좀 더 편리하고 능동적으로 프로그램의 사용이 가능할 것이고, 아울러 교육 프로그램이라는 기능에 일정 부분 기여할 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 실험실에서 개발한 후 지속적으로 새로운 기능을 추가 해오고 있는 자바 애플릿 형태의 격자 생성 프로그램에서 간단한 매개변수(parameter)들의 입력을 통해 특정문제에 관해 자동으로 최적의 격자를 생성할 수 있는 기능을 구현하게 되었다. 이는 유동 관련 이론 수업에서 접했던 몇 가지 특정 형상에 대해서 공력 해석을 쉽고 빠르게 진행할 수 있고, 간단한 수치 조작을 통해 결과 값의 추이를 분석하며 이론과 접목하여 이해력을 증진 시킬 수 있다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단사이언스·교육허브개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2014M3C1A6045113).

Note

This paper is a revised version of a paper presented at the KSCFE 2014 Fall Annual Meeting, Gyeongsang National University, Jinju, Nov.13-14, 2014.

Reference

- [1] 1997, Kim, B.S., "A Grid Generation Technique for the External Flow Fields Utilizing the Predictor-Corrector Scheme," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.2, No.1, pp.84-92.
- [2] 2001, John D.A.Jr., "Fundamentals of Aerodynamics 3rd Edition," *McGraw-Hill*, pp.515-525.
- [3] 1995, John D.A.Jr., "Computational Fluid Dynamics," *McGraw-Hill*, pp.285-288.
- [4] 1988, Charles L.L., "Effects of Independent Variation of Mach and Reynolds Number on the Low Speed Aerodynamic Characteristics of the NACA0012 Airfoil Section," *NASA Langley Research Center*, Hampton, Virginia, USA.