

2차원 유동 해석을 위한 OpenFOAM용 격자 생성 프로그램 개발

김 왕 현, 김 병 수*

충남대학교 항공우주공학과

DEVELOPMENT OF OPENFOAM GRID GENERATION PROGRAM FOR TWO-DIMENSIONAL FLOW ANALYSIS

W.H. Kim and B.S. Kim*

Dept. of Aerospace Engineering, Chungnam National Univ.

In this paper, a study on the development of OpenFOAM grid generation program for two-dimensional flow analysis is described. By using the pre-processor(eMEGA) of EDISON_CFD system, grids for OpenFOAM flow calculation were obtained. Resultant two-dimensional grids were used to calculate flow fields by applying simpleFoam, one of the OpenFOAM's popular solvers, and the obtained flow results were compared with theoretical and experimental data available. Also grids generated by present program were compared with grids by a commercial pre-processor Pointwise for the purpose of verification. Verification work includes three cases(single block, O-type single block, and multi block grid), and all results show reasonable matches. According to the current achievement, it can be concluded that OpenFOAM grid can be constructed conveniently by using eMEGA with GUI.

Key Words : 오픈폼(OpenFOAM), 심플폼(simpleFoam), 에디슨 전산열유체(EDISON CFD), 이메가(eMEGA), 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic User Interface), 격자 생성 프로그램(Pre-Processor)

1. 서 론

OpenFOAM은 Open Field Operation and Manipulation의 약자로서, 소스 코드가 공개된 전산유체해석 프로그램이다. GNU GPL(General Public License)을 사용하여 무료로 사용이 가능하다. 1990년대 초에 영국의 Imperial College에서 FOAM이라는 이름으로 개발이 시작되었고, 이후에 Jasak 박사와 Weller 박사에 의해 2가지의 버전으로 개발되고 있다. 유럽과 미국을 비롯한 외국의 여러 나라들에서는 오래 전부터 OpenFOAM 연구가 활발하게 진행되고 있고, 우리나라에서도 몇 년 전에 본격적으로 소개가 되어 사용자들이 점점 많아지고 있는 추세이다. OpenFOAM은 전 세계의 수많은 연구자들에 의해 개발되어 상용 프로그램보다 개발 속도가 매우 빠르고, 소스 코드를 공개하기 때문에 해석 자동화 및 다른 프로그램과의 연

동이 용이하며 연구 개발의 효율성이 증대된다. 또한 CFD Tool Box의 개념으로 개별 산업분야에 최적화된 기술개발이 가능하고 기능 추가가 용이하며 전용 해석자 제작을 통한 해의 정확성을 보장할 수 있다. 특히 초기 개발 비용만 투자하면 추후에 별도의 비용이 발생하지 않기 때문에 Copy 및 CPU 코어 수에 따른 상용 프로그램의 라이선스 비용에 대한 부담을 감소할 수 있다는 것이 가장 강력한 장점이다. 하지만 Linux라는 익숙하지 않은 운영체제에서 사용해야하고 전반적으로 TUI(Text User Interface) 작업환경으로 구성되어 있기 때문에 사용하는 데 어려움이 많음에도 불구하고 매뉴얼의 한계 및 기술지원 조직의 부재가 크다는 것이 단점이다. 현재 상용 프로그램의 라이선스 비용 문제가 점점 대두되고 있는 현실 속에 여러 학교와 기업에서 OpenFOAM 개발에 힘쓰고 있고, 정부에서도 in-house 코드 및 오픈 소스를 활용한 국내 코드 개발에 매진하고 있다.

현재 OpenFOAM 격자를 생성할 수 있는 방법으로는 먼저 기본적으로 OpenFOAM에 내장되어 있는 Console 타입의 격자 생성 프로그램인 blockMesh와 SnappyHexMesh 등이 있다. 하지만 TUI 기반으로 Dictionary 파일을 이용하여 격자를 생성

Received: February 11, 2016, Revised: June 7, 2016,

Accepted: June 7, 2016.

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

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2016.21.2.025>

© KSCFE 2016

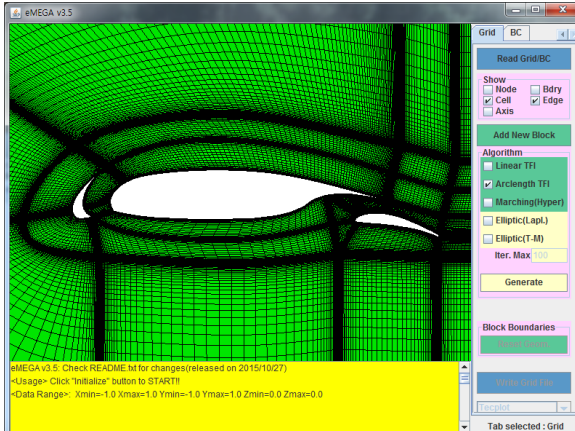


Fig. 1 eMEGA pre-processor

해야 하기 때문에 사용하는데 많은 불편함이 있다. GUI를 사용하면서 GPL 라이선스를 사용하는 공개 소프트웨어로는 EnGrid, Salome 등이 있지만 대체로 외국에서 Linux 기반으로 개발된 프로그램으로 국내 사용자가 접근하고 사용하는데 많은 어려움이 있다. ANSYS의 ICEM CFD나 Star CCM+의 격자 생성 프로그램, Pointwise 등의 상용 프로그램으로 비교적 손쉽게 격자를 생성할 수도 있지만 무료 사용을 추구하는 OpenFOAM의 취지에는 맞지 않다. 이에 본 연구실에서는 OpenFOAM 개발에 동참하고 관련 커뮤니티에 기여하기 위하여 OpenFOAM에서 비교적 취약하다고 볼 수 있는 Console 기반의 사용하기 어려운 격자 생성 방법을 대신할 수 있는 GUI 기반의 OpenFOAM용 전처리 프로그램을 개발하게 되었다.

2. 연구 방법

2.1 eMEGA 전처리 프로그램

본 연구실에서 개발하여 현재 EDISON_CFD 시스템[1]에서 전처리 프로그램으로 사용되고 있는 eMEGA는 Fig. 1과 같은 인터페이스를 가진 2차원 범용 격자 생성 프로그램이다. MEGA, Geometry, Spacing, Grid, BC 이렇게 총 5가지의 탭으로 구역이 나뉘어져 있다. 먼저 Geometry 탭에서는 Line, Arc, Circle에서부터 Cubic Spline, NURBS Curve를 통한 곡선까지 자유자재로 원하는 형상을 직접 생성할 수 있다. 또한 NACA 4-digit 에어포일 데이터가 내장되어 있고, 다른 에어포일이나 복잡한 형상들은 외부 데이터를 불러들여 형상을 정의할 수 있다. 이렇게 형상을 직접 그릴 수 있을 뿐만 아니라 직접 원하는 격자점 개수 및 조밀도 등을 Spacing 탭을 통해 설정할 수 있고, Grid 탭에서는 Arclength TFI와 Marching Hyperbolic 등의 알고리즘을 이용하여 다양한 방법으로 격자를 생성할



Fig. 2 Grid files for OpenFOAM

수 있다. 이렇게 형상 정의에서부터 격자 생성까지 일련의 전처리 과정을 모두 eMEGA를 통해 수행할 수 있다. 그렇기 때문에 OpenFOAM에서 사용 가능한 격자를 생성하기 위하여 기존에 잘 개발되어진 eMEGA 전처리 프로그램을 이용하기로 하였고, 기존의 EDISON용 격자 생성뿐만 아니라 동시에 OpenFOAM용 격자가 생성될 수 있도록 프로그램 수정 및 OpenFOAM에서 사용될 경계 조건 등의 추가 기능 개발을 진행하였다.

2.2 OpenFOAM 격자 포맷

정렬격자의 경우, 하나의 3차원 Cell은 각각 4개의 Node 점으로 구성된 6개의 Face들이 둘러싸여져 만들어진 육면체로 이루어져 있다. 격자를 구성하고 있는 각종 정보들은 Fig. 2와 같이 총 5개의 파일로 분할되어 저장된다.

먼저 격자를 구성하고 있는 각각의 Node 점들의 x, y, z 좌표 정보가 ‘points’ 파일에 작성되고, 하나의 Face를 구성하는 Node 점들이 묶여서 ‘faces’ 파일에 각각의 Face 정보들이 입력된다. 이 때 Node 점과 Face는 파일에 입력된 순서에 따라 0번부터 번호가 매겨진다. 다음으로 ‘owner’ 파일에는 각각의 Face들이 주인으로 삼고 있는 3차원 Cell들의 번호를 담고 있고, 이들 중에 격자의 내부를 구성하고 있는 Face들이 이웃으로 삼고 있는 3차원 Cell들의 번호가 ‘neighbour’ 파일에 작성된다. 마지막으로 나머지 바깥쪽의 Face들은 ‘boundary’ 파일을 통해 경계 조건 정보를 정의하는데 사용된다.

2.3 OpenFOAM 격자 생성 방법

OpenFOAM은 우선 기본적으로 3차원 격자를 지원하기 때문에, 2차원 해석 시에도 부피를 가지는 3차원 격자를 생성해야 한다. 다만 2차원 해석에 사용되는 3차원 격자는 z축으로 단 하나의 Cell을 가져야만 하기 때문에 eMEGA에서 생성된 Fig. 3의 2차원 격자는 Fig. 4와 같이 z축으로 하나의 Cell을 가지는 3차원 격자 파일로 자체 변환 되어 저장이 되도록 하였다. 따라서 생성된 3차원 격자는 부피를 갖는 여러 개의 3차원 Cell들로 이루어지게 된다. 이렇게 하나의 2차원 격자 파일을 5개의 OpenFOAM용 3차원 격자 파일로 변환시켜 저장하기 위해서 기존의 eMEGA 프로그램의 코드 수정은 필수적으로 수행되어야 했고, 이 과정에서 중요한 사실을 한 가지

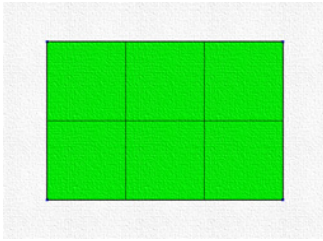


Fig. 3 2D grid by eMEGA

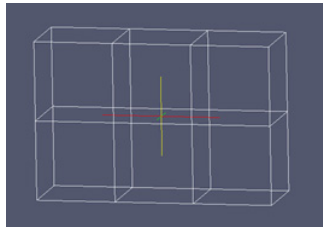


Fig. 4 3D grid for OpenFOAM

발견하였다. 바로 격자 파일에 내용이 입력되는 순서이다. 특히 5가지의 격자 파일 중에 ‘face’ 파일에 입력되는 Face의 순서가 가장 중요한 부분이다. Fig. 5는 Fig. 4의 격자를 구성하는 Cell과 Face의 번호를 도식화한 것이다.

원 안에 있는 숫자는 Cell의 번호이고, 사각형 안에 있는 숫자는 격자의 내부에 존재하는 Face의 번호이다. 테두리가 없는 숫자는 격자의 외곽을 둘러싸고 있으면서 동시에 경계 조건을 가지는 Face의 번호이다. 이 때, Cell의 번호는 격자를 구성하는 5개의 파일에 의해 결정되지만 사실상 일정한 순서에 따라 차례대로 Cell의 번호가 정해진 후에 Face의 순서가 정해진다고 볼 수 있다. 따라서 격자 파일을 구성하는 데 있어서 가장 중요한 것이 바로 Face의 순서를 결정하는 ‘face’ 파일이다. ‘face’ 파일에는 격자의 내부에 존재하는 Face들이 가장 먼저 입력되고, 다음으로 격자의 외곽을 둘러싸고 있는 Face들이 입력된다. 외곽의 Face들 중에 같은 경계 조건을 가지는 Face들은 서로 묶여서 차례대로 입력된다. 여기서 가장 중요한 점은 번호가 빠른 Cell의 주위를 둘러싸고 있는 Face가 먼저 입력이 되어야 한다는 것이다. 즉, 내부 Face 중에서도 빠른 번호의 Cell 주위에 있는 Face들이 먼저 입력되고, 이어서 같은 경계 조건끼리 묶이되 순서가 빠른 Cell 주위의 외곽 Face가 먼저 입력이 되는 것이다. 마지막으로서는 격자의 앞쪽과 뒤쪽을 둘러싸고 있는 frontAndBack 경계 조건의 Face들이 입력이 되는데, 이것도 0번 Cell의 앞과 뒤를 구성하는 Face가 먼저 입력이 되고 나머지 Face들도 Cell의 순서에 따라 차례대로 입력이 된다. 따라서 Fig. 5에는 숫자가 생략되어 있지만 격자의 Face는 0번부터 28번까지 총 29개로 구성되어

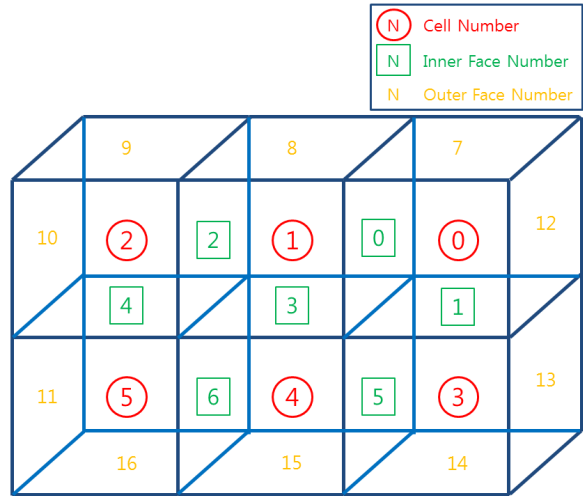


Fig. 5 Cell and face numbering of OpenFOAM grid

있는 것을 알 수 있다. 이러한 순서를 지키지 않은 무질서한 격자 파일을 이용하여 해석을 수행한다면 해석 시간이 매우 오래 걸리거나 수렴되지 않는 결과를 초래할 수 있기 때문에 격자 파일을 생성할 때 가장 중요하고 많은 주의를 요구한다.

3. 연구 결과

eMEGA를 통해 생성된 격자가 문제가 없는지 OpenFOAM으로 직접 해석을 하여 검증을 하였다. 검증은 격자의 형상에 따라 총 3가지의 해석을 통해 수행되었다. 먼저 단일 블록의 격자를 통해 평판의 유동해석을 수행하여 Blasius 해를 비교하였다. 두 번째로는 단일 블록이지만 하나의 면을 공유하는 O-type 형태의 격자 형상에 대한 검증을 위해 실린더의 유동 해석을 수행하였다. 마지막으로 에어포일의 공력해석을 수행함으로써 다중 블록으로 이루어진 격자에 대한 검증을 수행하였다. 또한 eMEGA를 통해 생성된 격자가 다른 격자 생성 프로그램을 이용하여 만들어진 격자와 얼마나 차이가 있는지 확인해 볼 필요성이 있다. 따라서 상용 프로그램으로서 충분한 신뢰성을 가진다고 판단되는 Pointwise를 이용하여 eMEGA와 최대한 동일한 정보를 갖는 격자를 생성하고, 똑같은 조건 하에서 해석을 수행한 후에 그 결과를 서로 비교해 보았다. eMEGA와 Pointwise에서 생성한 격자가 얼마나 동일한 형상을 갖는지 확인하기 위해 두 격자 사이에 각각 대응하는 Node 점을 비교하여 차이를 구하였다. 먼저 각각의 Node 점에서 발생하는 두 격자 간 x축 방향으로의 차이인 ‘dx’와 y축 방향으로의 차이인 ‘dy’를 구하였다. 이렇게 구한 ‘dx’와 ‘dy’를 각각 제공하여 더한 값의 제곱근인 ‘dist’를 변수로 하는 Contour

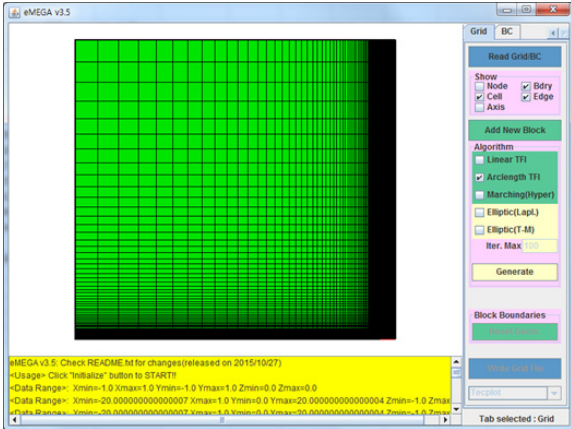


Fig. 6 Resultant grid for flat plate flow calculation

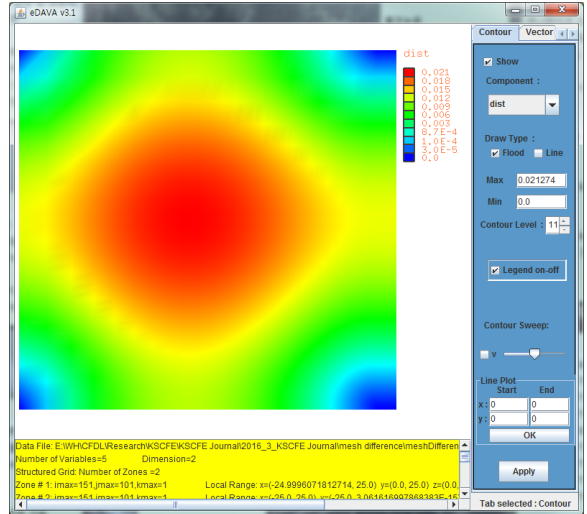


Fig. 7 Mesh difference of plate grid

를 그려 두 격자에 대한 비교를 수행하였다.

이 때 해석은 모두 OpenFOAM에 기본적으로 내장되어 있으면서 각종 난류 모델을 이용하여 정상 상태의 해석을 수행할 수 있는 simpleFoam을 이용하였다. 가상 머신을 이용하여 Linux Ubuntu ver. 14.04 LTS 운영체제에서 작동을 하였고, OpenFOAM ver. 2.4.0을 사용하였다.

3.1 단일 블록 격자 검증

3.1.1 단일 블록 격자 생성 및 분석

평판의 유동해석을 통해 단일 블록을 갖는 격자의 검증을 수행하였다. 첫 번째 검증에 사용된 격자 형상은 Fig. 6와 같은 단일 블록 격자이다. Table 1을 통해 알 수 있듯이 격자의 오른쪽 아래에 길이가 1 m인 평판이 있고, 위쪽과 앞쪽으로

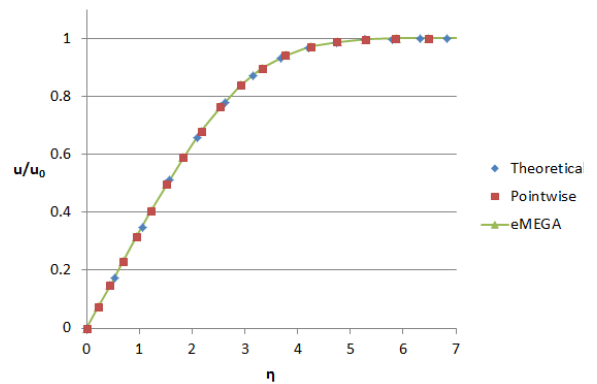


Fig. 8 Blasius solution comparison at 50% position

Table 1 Grid system for plate flow calculation

Chord length	1
X range	-20 ~ 1
Y range	0 ~ 20
Total cell	25,000

Table 2 Solver setting for plate flow calculation

Velocity	1 m/s
Reynolds number	10,000
Application	simpleFoam
Time	Steady
Viscous model	Laminar

Table 3 Grid check of plate

	eMEGA	Pointwise
Min. volume	1.499899 e-06	1.5 e-06
Max. orthogonal quality	1.0	1.0
Max. aspect ratio	1.49541 e+03	1.5 e+03

평판의 길이에 20배만큼 큰 도메인을 갖고 있다. Table 2에서 볼 수 있듯이 간략하게 Blasius 해를 계산하기 위해 평판의 길이와 속도를 1 m/s로 하였고, Reynolds 수가 10,000이 되도록 밀도와 점성계수를 결정하였다. Table 3에서 eMEGA와 Pointwise에서 생성된 격자의 질을 확인하였고, Fig. 7은 두 격자 간의 형상 차이를 Contour로 나타낸 것이다. 두 격자 간에 최대 0.021의 거리('dist') 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

3.1.2 단일 블록 격자 해석 결과

먼저 이론식을 이용하여 Blasius 해[2]를 계산하고, eMEGA와 Pointwise를 통해 생성된 격자를 해석하여 얻어진 결과 값을 이용하여 각각의 평판 유동해를 구하였다. 이를 이용하여 평판의 50% 지점에서의 Blasius 해를 Fig. 8을 통해 비교해보았다. 이론식과 eMEGA의 격자, 그리고 Pointwise의 격자에서

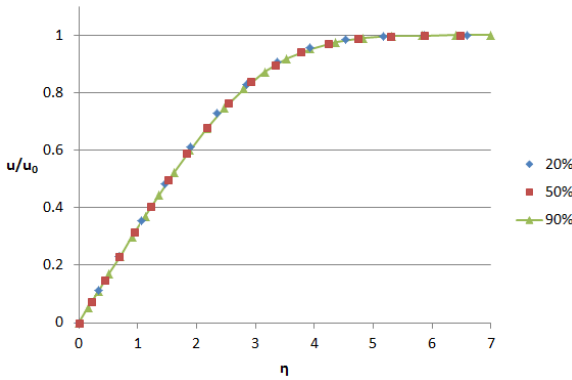


Fig. 9 Plate flow solution of eMEGA at each position

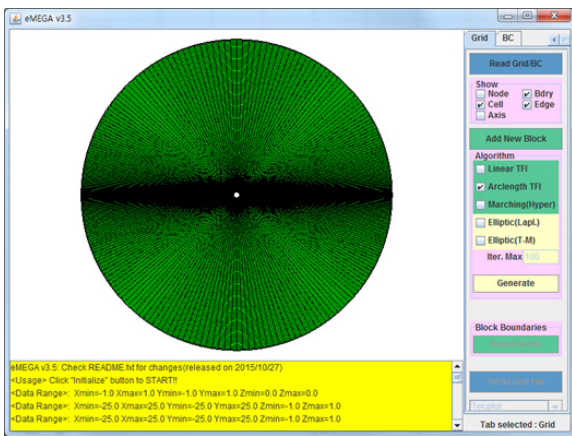


Fig. 10 Resultant grid for cylinder flow calculation

모두 거의 동일한 Blasius 해를 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 eMEGA의 격자를 통해 얻은 해석 결과를 이용하여 평판의 30%, 50%, 90% 지점에서의 Blasius 해를 서로 비교해 보았고, Fig. 9에서 볼 수 있듯이 모두 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 eMEGA를 이용한 단일 블록의 격자 생성이 문제없이 제대로 이루어지는 것을 확인하였다.

3.2 O-type의 단일 블록 격자 검증

3.2.1 O-type의 단일 블록 격자 생성 및 분석

실린더의 유동해석을 통해 O-type의 단일 블록을 갖는 격자의 검증을 수행하였다. 첫 번째 검증에 이어서 두 번째 검증에 사용된 격자 형상은 Fig. 10과 같다. Table 4와 같이 Chord 길이의 25배 크기를 가지는 도메인을 생성하였고, Table 5에서 볼 수 있듯이 1에서 22까지의 Reynolds 수에서 해석을 진행하였다. 격자는 단일 블록으로 이루어져 있으며 실린더 뒷부분의 Wake 선에서 서로 만나 하나로 합쳐지는 형

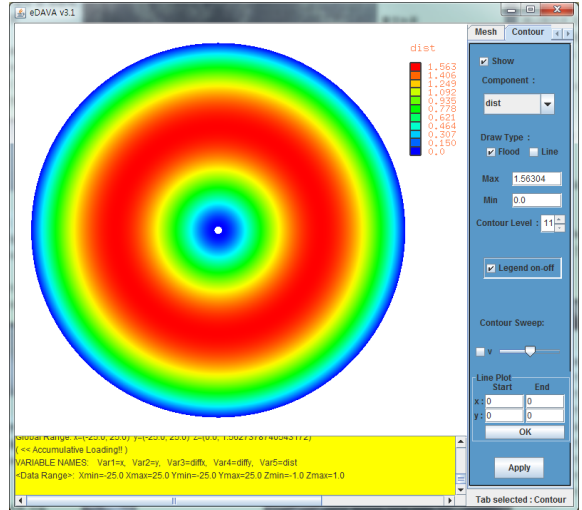


Fig. 11 Mesh difference of cylinder grid

태이다. Table 6에서 eMEGA와 Pointwise에서 생성된 격자의 질을 확인하였고, Fig. 11은 두 격자 간의 서로 대응되는 격자 점 간의 거리 차이를 Contour로 나타낸 것이다. 이 때, End Spacing을 별도로 정의하지 않아서 두 프로그램 간의 격자 생성 방식에 따라 최대 1.563의 차이가 발생하였다.

3.2.2 O-type의 단일 블록 격자 해석 결과

eMEGA와 Pointwise를 통해 생성된 격자의 해석 결과는 Fig. 12를 통해 Tritton[3]의 실험 결과와 서로 비교하였다. eMEGA와 Pointwise 격자의 해석 결과는 거의 일치하였고, Reynolds 수가 1에 가까울수록 약간의 차이를 보였지만 실험

Table 4 Grid system for cylinder flow calculation

Chord length	1
X range	-25 ~ 25
Y range	-25 ~ 25
Total cell	30,000

Table 5 Solver setting for cylinder flow calculation

Reynolds number	1 ~ 22
Application	simpleFoam
Time	Steady
Viscous model	Laminar

Table 6 Grid check of cylinder

	eMEGA	Pointwise
Min. volume	1.202244 e-04	1.202038 e-04
Max. orthogonal quality	2.11787 e-01	2.11711 e-01
Max. aspect ratio	8.69990 e+01	8.70382 e+01

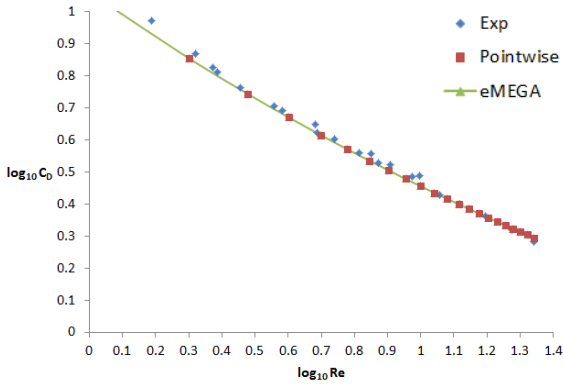


Fig. 12 Drag coefficient according to Reynolds number

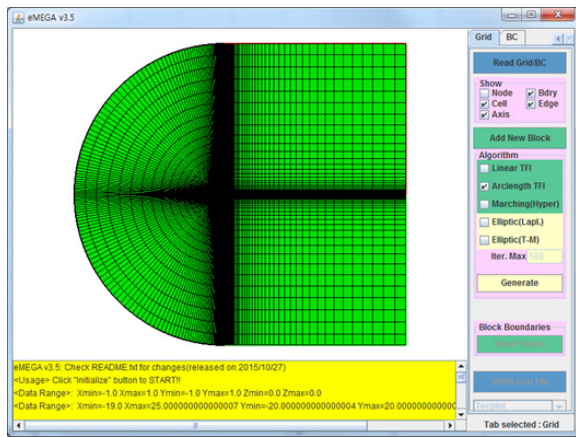


Fig. 13 Grid for NACA0012 airfoil flow calculation

결과와 전체적으로 거의 비슷한 수치를 갖는 것을 확인하였다. 이를 통해 앞서 수행한 단일 블록 격자 생성에 이어서 eMEGA를 이용하여 만든 O-type의 단일 블록의 격자 생성 또한 문제없이 제대로 이루어지는 것을 확인하였다[4].

3.3 다중 블록 격자 검증

3.3.1 다중 블록 격자 생성 및 분석

다중 블록에 대한 격자의 검증은 NACA0012 에어포일의 유동해석을 통해 수행하였다. 마지막 세 번째 검증에 사용된 격자는 Fig. 13과 같이 3개의 블록으로 이루어진 C-type 형상이다. 블록 하나가 에어포일을 덮고 있고, 에어포일 뒤쪽으로 위아래에 블록이 각각 하나씩 위치하고 있다. 격자는 Table 7과 같이 Chord 길이보다 20배 정도 큰 도메인을 갖고 있고, 보다 정확한 점성 해석을 위해 난류 모델을 고려하여 y^+ 를 1 이하로 하여 첫 격자 간격을 결정하였다. Table 8의 유동 조건은 Charles[5]의 연구 결과를 바탕으로 결정하였고, 이 때

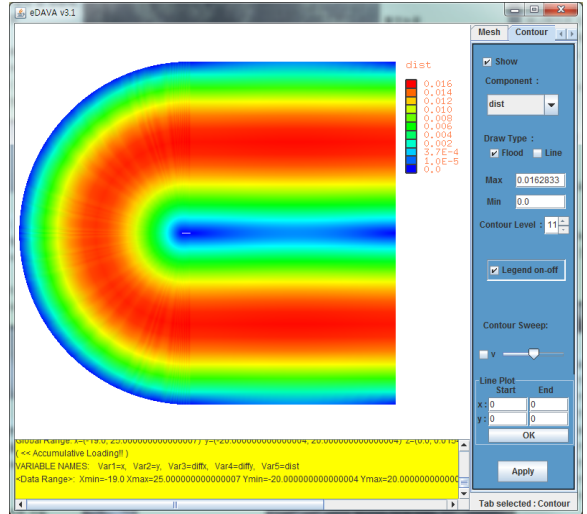


Fig. 14 Mesh difference of NACA0012 airfoil grid

Mach 수와 Reynolds 수는 각각 3,990,000을 갖는다. 난류 모델은 $k-\omega$ SST를 사용하였고, 받음각 -4° 에서부터 19° 까지 1° 간격으로 해석을 진행하였다. Table 9에서 eMEGA와 Pointwise에서 생성된 격자의 질을 확인하였고, Fig. 14은 두 격자 간의 형상 차이를 Contour로 나타낸 것이다. 두 격자 간에 최대 0.016의 거리 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

3.3.2 다중 블록 격자 생성 및 분석

eMEGA와 Pointwise로 생성한 격자를 통해 얻은 해석 결과

Table 7 Grid system for NACA0012 airfoil

Chord length	1
X range	-19 ~ 25
Y range	-20 ~ 20
Total cell	35,000

Table 8 Solver setting for NACA0012 airfoil

Mach number	0.15
Reynolds number	3,990,000
Application	simpleFoam
Time	Steady
Viscous model	$k-\omega$ SST

Table 9 Grid check of NACA0012 airfoil

	eMEGA	Pointwise
Min. volume	4.757113 e-10	4.751109 e-10
Max. orthogonal quality	2.18436 e-01	2.19344 e-01
Max. aspect ratio	2.99525 e+05	3.0 e+05

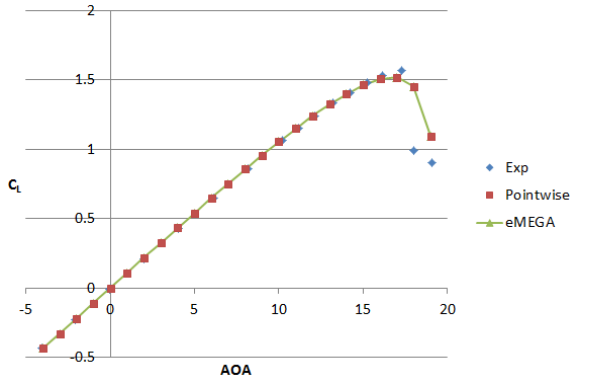


Fig. 15 NACA0012 lift coefficient

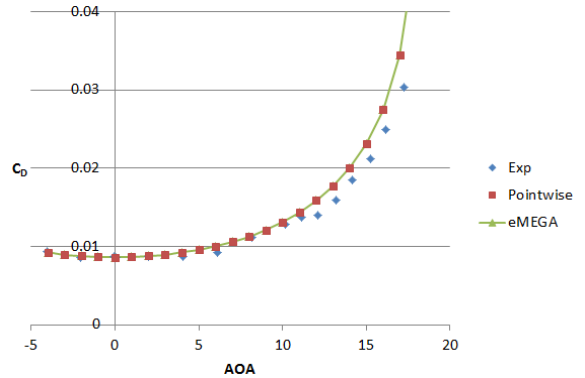


Fig. 16 NACA0012 drag coefficient

를 Fig. 15과 Fig. 16을 통해 Charles[5]의 연구 결과와 비교해 보았다. 양력계수의 경우에는 실속 부근에서 약간의 차이가 있지만 거의 비슷한 값을 나타냈고, 항력계수의 경우에는 비록 받음각이 커지면서 많은 차이가 발생하였지만 낮은 받음각에서는 어느 정도 일치하는 것을 확인하였다. eMEGA로 생성한 격자와 Pointwise로 생성한 격자의 해석 결과는 거의 일치하기 때문에, 이와 같은 차이는 격자의 문제가 아닌 해석자 설정 등에서 발생하는 차이에 의한 것으로 생각된다. 따라서 eMEGA에서 생성한 다중 블록 격자 생성이 문제없이 제대로 이루어지는 것을 확인하였고, 이로써 2차원 해석을 위한 마지막 세 번째 검증까지 모두 수행되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 EDISON_CFD의 eMEGA 전처리 프로그램을 이용하여 총 3가지의 OpenFOAM 2차원 해석용 격자를 생성하였다. 생성된 격자를 이용하여 OpenFOAM 해석을 통해 격자가 문제없이 제대로 생성되는지 검증을 수행하였고, 상용 프로그램인 Pointwise 격자와의 비교 검증을 통해 eMEGA에서 생성한 격자의 신뢰성을 확보하기 위한 연구를 수행하였다. eMEGA와 Pointwise를 통해 격자를 생성하는 과정에서 발생한 두 격자 간의 차이가 다소 큰 경우도 있었지만 모든 검증 과정에서 유동장 해석 결과가 거의 동일한 결과를 갖는 것을 확인할 수 있었고, 이러한 결과를 통해 해석하고자 하는 물체에서 멀리 떨어진 곳의 격자 형상은 해석 결과에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다.

국내의 OpenFOAM 사용자들은 그동안 TUI 방식으로 격자를 생성해왔고, GUI 방식의 격자 생성을 위해서는 상용 전처리 프로그램을 이용하거나 외국에서 개발되어 접근이 어려운 프리웨어들을 사용해왔다. 본 연구를 통해서 이제는 eMEGA를 이용하여 OpenFOAM 2차원 해석용 격자를 생성하는 것이

가능해졌기 때문에, 앞으로 더욱 활발한 OpenFOAM 커뮤니티 활동과 연구가 이루어지기를 기대한다.

후 기

이 논문은 CNU학술연구비의 일부 지원을 받아 수행된 연구(2015년 학술연구진흥사업)임.

Note

This paper is a revised version of a paper presented at the KSCFE 2015 Fall Annual meeting, Hanyang University ERICA, Ansan, Oct. 29-30, 2015.

References

- [1] EDISON_CFD System, <https://www.edison.re.kr/web/cfd>.
- [2] 1988, Tritton, D.J., "Physical Fluid Dynamics Second Edition," *Oxford University Press*, pp.127-131.
- [3] 1959, Tritton, D.J., "Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers," *Cavendish Laboratory*, Cambridge, UK.
- [4] 2010, Fox, R.W., Pritchard P.J. and McDonald, A.T., "Introduction to Fluid Mechanics Seventh Edition," *Wiley*, pp.412-420.
- [5] 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.