

# 포텐셜 해석자를 이용한 2차원 유동의 격자 생성 연구

이 재 훈,<sup>1</sup> 정 경 진<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>대한항공기술연구원

<sup>2</sup>국방과학연구소

## A STUDY ON THE GRID GENERATION FOR TWO-DIMENSIONAL FLOW USING A POTENTIAL SOLVER

J. Lee<sup>1</sup> and K. Jung<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Koreanair R&D Center

<sup>2</sup>Agency for Defense Development

*One of the obstacles on the grid generation for complex geometries with multi-block structured grids is the domain decomposition. In this paper, the domain decomposition for two-dimensional flow is studied using the flow characteristics. The potential flow equation with the source distribution on the panel surface is solved to extract the information of the flow. The current approach is applied to a two-dimensional cylinder and Bi-NACA0012 problems. The generated grids are applied to generic flow solvers and reasonable results are obtained. It can be concluded that the current methods is useful in the domain decomposition for the multi-block structured grid.*

**Key Words :** 격자 생성(Grid Generation), 영역 분할(Domain Decomposition), 포텐셜 해석자(Potential Solver), 다중블록 정렬 격자(Multi-block Structured Grid)

### 1. 서 론

일반적으로 복잡한 물체에 대해 다중블록 정렬 격자(multi-block structured grid) 생성 시 유체가 위치하는 영역의 분할은 쉽지 않다. 단순한 형상에 대해서는 C 타입, O 타입, H 타입 등의 정형화된 Topology를 사용하여 고품질의 단일블록 격자를 생성 할 수 있다. 이들 세 가지 격자 타입을 Fig. 1에 표시하였다. 복잡한 형상이나 다물체에 대해서는 정형화된 Topology가 없기 때문에 생성하는 사람의 노하우나 경험에 따라 격자의 품질이 달라진다. 일반적으로 정렬 격자의 단점으로는 불필요한 공간에 셀 개수가 많아져서 계산 부하가 증가하는 경향이 있다. 그러나 단순한 형상의 경우 유동 방향과 격자 방향이 일치할 경우 수치 확산(numerical diffusion)이 작아지는 장점이 있다. 또한 세장비가 큰 경우에도 셀의 품질(quality)이 좋은 점도 장점으로 꼽을 수 있다.

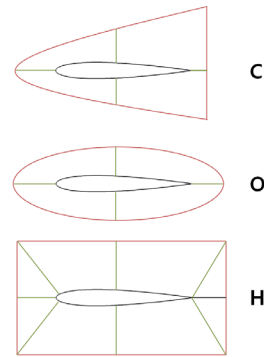


Fig. 1 Grid topologies for a single domain

기존 연구 경향을 살펴보면 Sikora and Miranda[1]는 1980년대 중반에 전자기학의 원리를 이용해 격자 생성 기법을 제안하였다. 물체 표면과 물체를 둘러싼 원방에 서로 다른 전하가 균일하게 분포한다고 가정해 포텐셜 방정식을 풀이하여 직교하는 전자기장의 필드선(field line)과 등포텐셜선(equi-potential line)을 구하였다. 포텐셜 방정식의 풀이에는, 3차원 용출(source)-더블렛(doublet) 패널 코드인 QUADPAN이 이용되었으

Received: February 15, 2016, Revised: March 15, 2016,

Accepted: March 15, 2016.

\* Corresponding author, E-mail: aeroperf@naver.com

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2016.21.1.036>

© KSCFE 2016

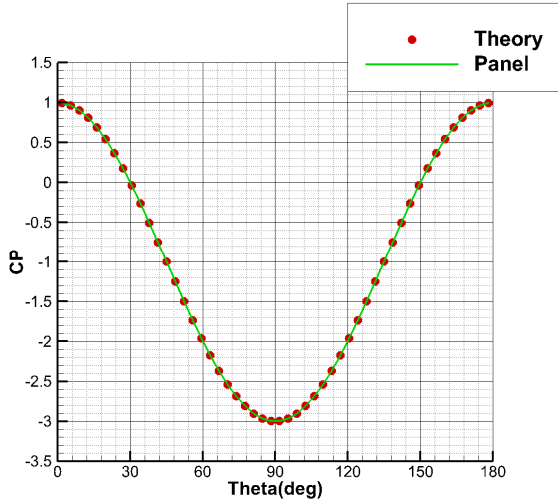


Fig. 2 Comparison of pressure coefficient for a circular cylinder

며 경계 조건을 전자기학 원리에 맞게 수정하였다. Runge-Kutta 기법을 이용해 미분 방정식 풀이해 전자기학의 필드선과 등포텐셜선을 계산해 전체 유동 영역에 대한 격자를 생성하였다. 제안된 방법으로 익형, 3차원 날개, 전투기 형상의 항공기에 대해 적용하였다.

Spekreijse and Kok[2]은 Sikora의 격자 생성 방법을, NLR이 보유한 CFD 해석 시스템인 ENFLOW의 영역 분할 프로그램인 ENDOMO에 적용하였다. 즉, 복잡한 3차원의 형상에 대한 영역 분할을 위해 Sikora의 방법을 적용한 것이다. 전체 격자 생성이 아닌 블록 생성을 위한 영역 분할의 수단으로 활용한 점에 차이가 있다. 영역 분할 시에 점진적 적용 방법을 소개하였는데 이는 원방을 점진적으로 증대시키며 필드선을 확장하는 방법으로 이를 이용해 항공기 전기체에 대한 영역 분할을 할 수 있었다.

본 논문에서는 유동 특성을 고려한 다중블록 정렬 격자의 생성을 위한 영역 분할 기법에 대한 연구를 수행했다. 2차원 유동의 영역 분할을 위해 2차원 벽면에 용출 분포에 의한 포텐셜 유동을 계산하였다. 이로 인해 생성되는 물체 부근의 등포텐셜선과 유선(streamline) 분포를 이용해 영역 분할을 하였다. 2차원 실린더 문제와 Bi-NACA0012 문제에 대해 현재 방법을 적용하여 격자를 생성하였고 유동해석자에 적용하여 현재 방법의 유용성을 확인하고자 하였다.

## 2. 격자 생성

### 2.1 포텐셜 해석자

비압축성 비회전(irrotational) 유동의 연속 방정식은 식 (1)

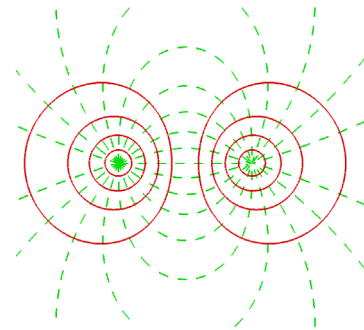


Fig. 3 Equipotential line and streamline for source and sink

로 표시할 수 있으며 포텐셜 방정식이다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

경계 조건은 물체 표면의 수직 방향의 속도가 0이며 식 (2)와 같다.

$$\nabla \phi \cdot \mathbf{n} = 0 \tag{2}$$

포텐셜 유동의 해석에는 다양한 특이점 요소가 있으나 현재 연구에서는 등강도(constant strength)의 용출 요소를 사용하였다[3]. Fig. 2에 2차원 실린더에 대한 포텐셜 유동 해석 결과와 이론치의 압력 계수를 비교하였다. Fig. 2에서 포텐셜 해석자와 이론치의 압력 계수는 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이론치는 균일 유동과 더블렛의 중첩(superposition)으로 구해졌으며 식 (3)과 같다[4].

$$C_p = 1 - 4\sin^2\theta \tag{3}$$

### 2.2 영역 분할

포텐셜 해석자로 구해진 각 패널에서의 용출 강도(source strength)를 이용하면 식 (4)와 같은 속도 포텐셜이 정의될 수 있다. 속도 포텐셜에 접한 곡선 X(s)가 있다고 할 때 포텐셜의 정의에 의해 식 (5)로 표현할 수 있다. 식 (5)는 상미분 방정식(ordinary differential equation)으로 x, y 방향에 대해 각각 predictor, corrector 방식으로 풀이가 가능하다. 이를 식 (6), (7)에 표시하였다. Fig. 3에 용출과 흡입(sink)이 인접한 경우에 대해 계산된 등포텐셜선과 유선을 표시하였다. 계산된 등포텐셜선과 유선이 서로 수직으로 만나는 것을 볼 수 있다.

$$\mathbf{q} = \nabla \phi \tag{4}$$

$$\frac{d\mathbf{X}}{ds} = \frac{\mathbf{q}}{|\mathbf{q}|} \quad (5)$$

$$\mathbf{X}_{predictor} = \mathbf{X} + \delta s \left( \frac{\mathbf{q}}{|\mathbf{q}|} \right) \quad (6)$$

$$\mathbf{X}_{corrector} = \mathbf{X} + \delta s \left( \frac{\mathbf{q}_{avg}}{|\mathbf{q}_{avg}|} \right) \quad (7)$$

등포텐셜선의 계산은 물체의 위에서 시작하며 유선은 물체 전방에서 시작한다. 사용 경험에 의하면 시작점과 물체 사이의 거리는 물체 길이의 1.5배 내외가 적당하였다. 각 선은 사용자가 지정한 선들의 개수만큼 등간격으로 생성된다.

### 2.3 격자 생성

영역 분할된 결과인 등포텐셜선과 유선은 최종적으로 격자 생성 프로그램으로 읽어 들어 격자를 만들게 된다. 현재 연구에서는 GUI 기반의 격자 생성 프로그램인 Pointwise가 사용되었다[5]. 읽어 들인 등포텐셜선과 유선 중에서 사용자가 4개의 모서리가 되도록 선들을 선택한다. Pointwise의 선에 대한 편집 기능을 사용해 선택된 선들을 연결하여 영역을 생성한다. 영역 분할 시에 물체의 형상을 그대로 사용할 경우 물체 주위 격자의 직교성이 낮아질 수 있다. 따라서 물체 주위에 수직한 방향으로 격자를 생성하고 격자의 외곽 경계를 사용하여 영역 분할을 한다. 이와 같은 방법으로 물체 주위 격자의 직교성을 유지하면 점성 유동의 계산에 적합한 격자를 획득할 수 있다.

## 3. 유동 해석

생성된 격자를 실제 유동 해석 프로그램에 적용해 격자 생성 기법의 유용성을 파악하였다. 유동 해석 프로그램은 정렬 및 비정렬 기반의 해석자를 모두 고려하여 두 가지 타입의 해석자에 대해 비교하고자 한다.

Fluent는 비정렬 기반의 유동 해석 프로그램이다. 유동 외에도 연소, 열, 음향 등의 해석이 가능한 범용 툴이다[6]. 다양한 격자 타입을 지원하며 이차원의 경우 삼각형, 사각형 격자가 사용 가능하고, 삼차원의 경우 사면체(tetrahedral), 프리즘(prism), 피라미드(pyramid), 육면체(hexahedral), 다면체(polyhedral)가 사용 가능하다. 난류 모델은 Menter의 SST(Shear Stress Transport)가 사용되었다. 수치 유속은 2차 정확도 Upwind TVD(total variation diminishing)가 사용되었다.

KFLOW는 정렬 격자 기반의 in-house 코드로 주로 외부 유동의 해석에 사용되어져 왔다[7]. 유한차분에 기반하기 때문에 사각형과 육면체 격자만 사용 가능하다. Fluent와의 비교를

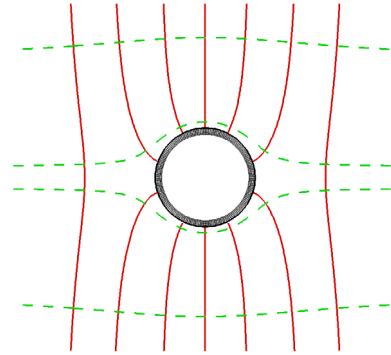


Fig. 4 Domain for a circular cylinder

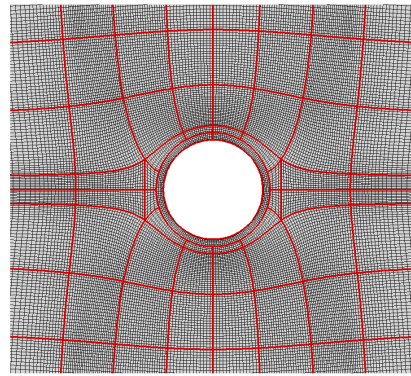


Fig. 5 Grid for a circular cylinder

위해 난류 모델은 동일한 SST가 사용되었다. 정상 유동의 시간 전진에는 DADI(Diagonalized Alternating Direction Implicit), 수치 유속은 3차 정확도 MUSCL(Monotonic Upstream-Centered Scheme for Conservation Laws)이 사용되었다.

## 4. 예 제

### 4.1 단일의 2차원 실린더

2차원 실린더 문제에 대해 격자 생성 및 유동해석을 수행하였다. 레이놀즈수가 100인 층류 유동 문제이며 실린더 후방에 주기적인 와류가 생성되어 비정상 유동 해석이 필요하다. 와류 생성 한 주기에 100번의 반복 계산이 되도록 시간 간격을 설정하였다. 층류의 저마하수 문제이므로, Fluent는 SIMPLE를 사용했으며 KFLOW는 예조건화 기법을 사용하였다. 비정상 해석에 앞서 정상 해석을 5000번 수행하였으며 이 결과를 비정상 해석의 초기값으로 사용하였다.

Fig. 4, 5에는 영역 분할 결과와 생성된 격자를 표시하였다.

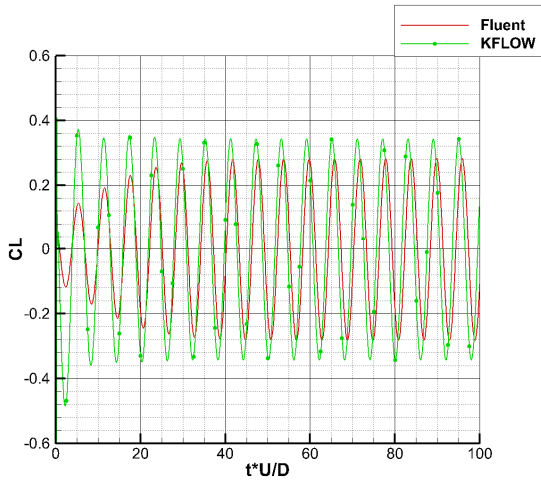


Fig. 6 History of lift coefficients

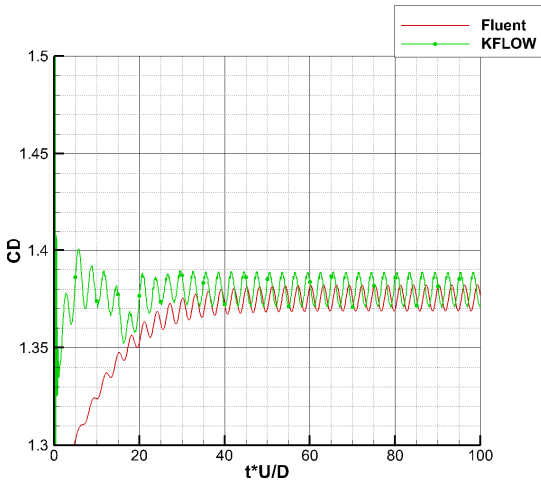


Fig. 7 History of drag coefficients

Fig. 4에서 실선은 등포텐셜선, 점선은 유선을 의미한다. 등포텐셜선은 물체와 일정한 간격이 있는 외부에 닿아 있는 것을 볼 수 있다. 이는 2.3에서 설명한 바와 같이 영역 분할을 물체에 수직인 방향으로 생성된 격자 외곽에 적용했기 때문이다. 생성된 격자에는 70개의 영역과 4만 7천개의 셀이 존재한다.

Table 1 Comparison of Drag Coefficient and Strouhal Number

|        | CD       | St    |
|--------|----------|-------|
| Fluent | 1.3755   | 0.162 |
| KFLOW  | 1.3799   | 0.167 |
| Braza  | 0.96-1.2 | N/A   |
| White  | 1.46     | N/A   |
| Roshko | N/A      | 0.167 |

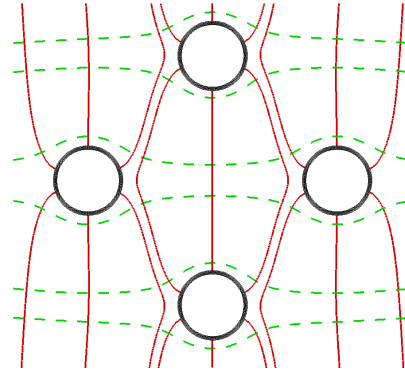


Fig. 8 Domain for cylinder

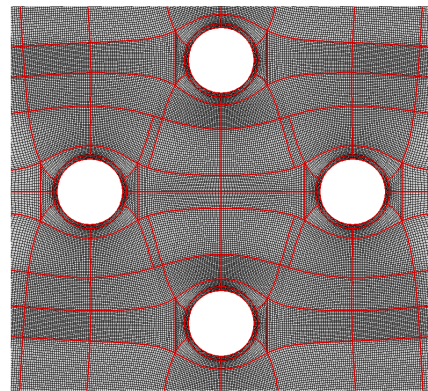


Fig. 9 Grid for cylinder

다. Table 1과 Fig. 6, 7에는 해석 결과를 표시하였다. Table 1에서 Braza, White, Roshko는 실험 결과를 의미한다[8-10]. White는 기존 실험 결과로부터 구해진 실험식에 현재 해석 조건의 레이놀즈수를 대입해 계산된 항력 계수이다. Fluent와 KFLOW의 항력 계수와 St 수는 서로 잘 일치하며 실험과도 유사성이 높게 나타나고 있다. Fig. 6, 7은 비정상 해석의 무차원화된 시간에 대한 양력과 항력의 추세를 보여주고 있다. 해석 프로그램에 따라 공력 계수의 최대치와 최소치에 차이가 있으나 이는 각 해석 프로그램의 수치 기법의 차이에 의한 것으로 보인다.

#### 4.2 4개의 2차원 실린더

4개의 2차원 실린더 문제는 중첩격자의 테스트에 사용되는 문제로 실험치와의 비교는 하지 않았으며 생성된 격자에 대해 해석을 수행하였다[11]. 해석 조건은 4.1의 예제와 동일하며 Fluent와 KFLOW를 사용해 해석하였다.

Fig. 8, 9에 영역 분할 결과와 생성된 격자를 표시하였다.

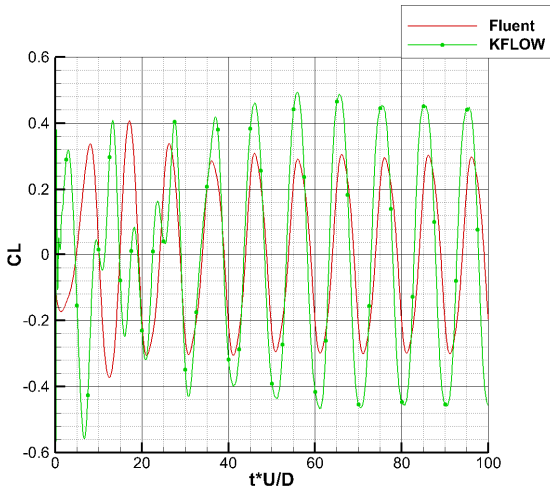


Fig. 10 History of lift coefficients

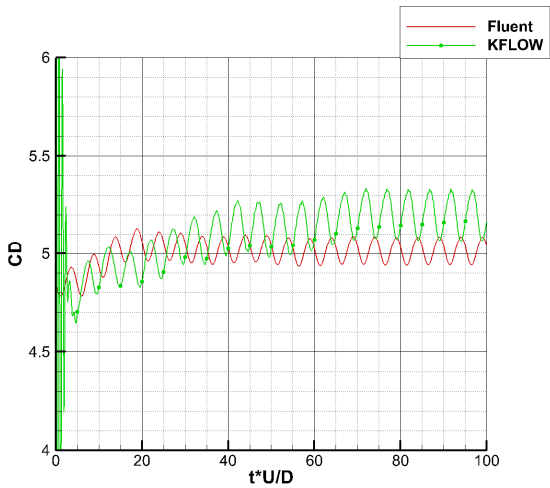


Fig. 11 History of drag coefficients

생성된 격자에는 125개의 영역과 10만개의 셀이 존재한다. Fig. 10, 11에 시간에 따른 양력과 항력의 추세를 나타내었다. 항력의 경우 단일 실린더의 대수합보다는 작게 나타나며 이는 오른쪽의 실린더가 왼쪽 실린더의 후류 내부에 위치하기 때문으로 추정된다.

**4.3 Bi-NACA0012**

Bi-NACA0012는 4.2와 마찬가지로 중첩격자의 테스트에 사용되는 문제로 실험치는 없으며 주로 해석 프로그램 간의 결과를 비교하였다[11]. 해석 조건은 마하수 0.7, 레이놀즈수  $6.5 \times 10^6$ 으로 설정하였으며, 받음각은 0도이다. Fluent는 압축성

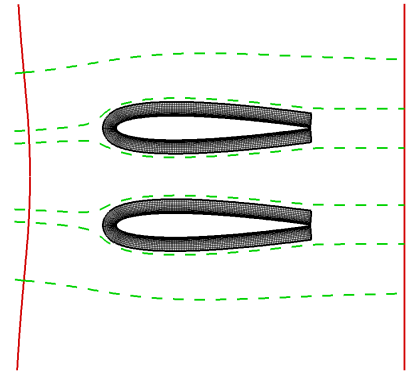


Fig. 12 Domain for bi-NACA0012

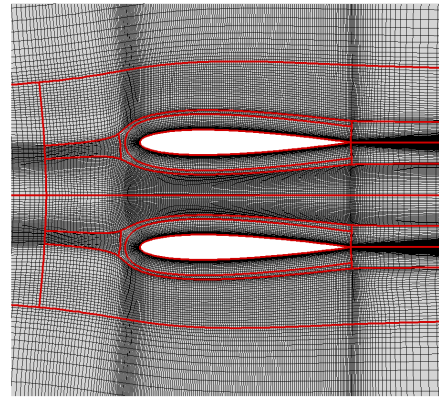


Fig. 13 Grid for bi-NACA0012

효과를 고려하기 위해 압력기반 해석자(pressure-based solver)의 coupled algorithm을 사용했다.

Fig. 12, 13에는 영역 분할 결과와 생성된 격자를 표시하였다. 격자는 위아래 대칭성을 유지하기 위해 위쪽 익형에 대해 생성 후 아래쪽으로 대칭 이동시켰다. 생성된 격자에는 24개의 영역과 14만개의 셀이 존재한다. Table 2와 Fig. 14-18에 해석 결과를 표시하였다. Table 2의 공력 계수에서 양력은 위아래 대칭 형상으로 인해 0에 가까운 값으로 나왔으며 항력은 해석 기법의 차이에 의해 약 57 count의 차이가 발생한 것으로 보인다. Fluent의 수치유속에는 Rhie-Chow 기법과 2차 Upwind TVD가 사용되지만, KFLOW에는 Roe의 FDS와 MUSCL이 사용되어 이와 같은 차이를 준 것으로 보인다. Fig.

Table 2 Comparison of Lift and Drag Coefficients

|        | CL     | CD     |
|--------|--------|--------|
| Fluent | 0.0004 | 0.0601 |
| KFLOW  | 0.0000 | 0.0658 |

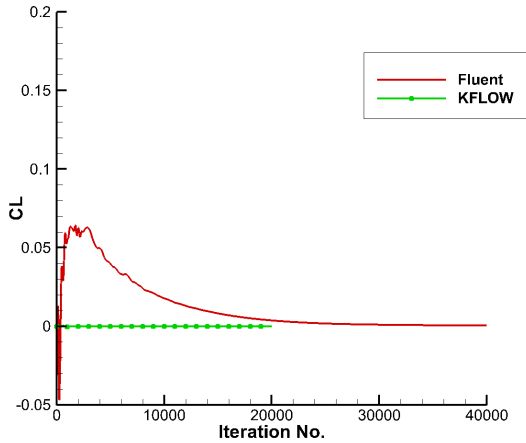


Fig. 14 Convergence of lift coefficients

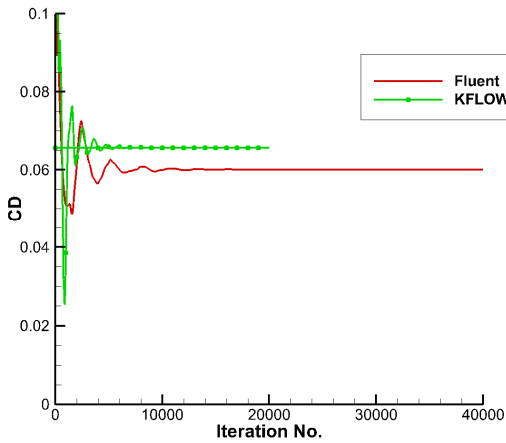


Fig. 15 Convergence of drag coefficients

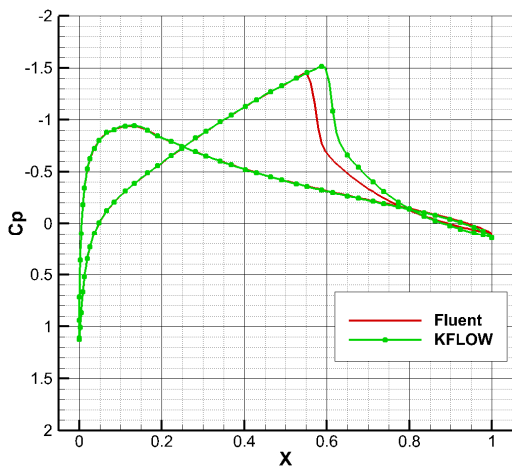


Fig. 16 Comparison of pressure coefficients

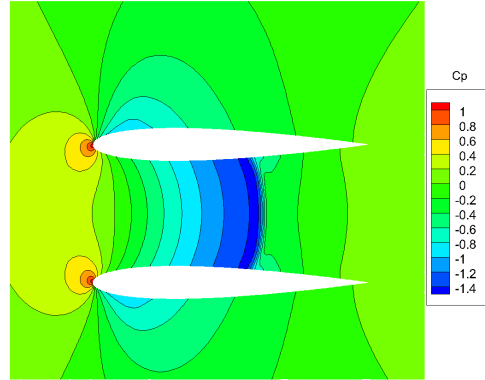


Fig. 17 Pressure coefficients from Fluent

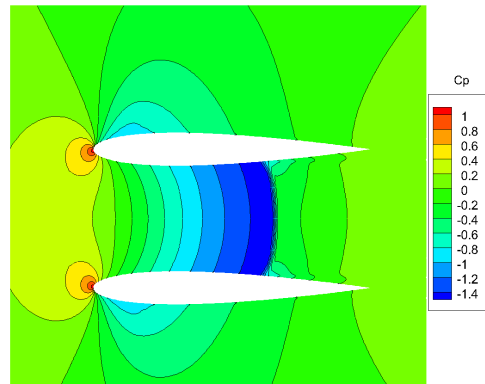


Fig. 18 Pressure coefficients from KFLOW

14, 15의 공력 계수 수렴성을 보면 20,000 ~ 40,000번의 반복 계산 내에서 일정한 값으로 수렴되는 경향을 보여준다. Fluent에 비해 KFLOW의 공력 계수가 더 빨리 수렴하는 것을 볼 수 있다. Fig. 16에는 표면 압력 계수를 비교했으며 시위 60% 지점에서 충격파가 발생해 압력 계수의 불연속이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fluent는 충격파 발생 위치가 KFLOW에 비해 전방에 발생하는 것으로 예측하며 이는 전술한 바와 같이 해석 기법의 차이에 의해 것으로 추정된다. Fig. 17, 18에는 Fluent와 KFLOW로 계산된 유동 내부에서의 압력 계수이며 충격파 후방에서 차이가 있지만 그 외에는 대부분의 영역에서 서로 유사한 것을 볼 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 유동 특성을 고려한 다중블록 정렬 격자의 생성을 위한 영역 분할 기법에 대한 연구를 수행했다. 2차원 유동의 영역 분할을 위해 2차원 벽면에 source 분포에 의한

포텐셜 유동을 계산하였다. 이로 인해 생성되는 물체 부근의 유선과 포텐셜 분포를 이용해 영역 분할을 하였다. 2차원 실린더 문제와 Bi-NACA0012 문제에 대해 현재 방법을 적용하여 격자를 생성하였고 유동해석자에 적용하여 타당한 결과가 나오기를 확인하였다. 현재의 접근방법이 복잡한 형상에 대해 다중블록 정렬 격자 생성 시 유용함을 알 수 있었다. 향후에는 현재의 기법을 3차원 격자 생성으로 확장하여 격자 생성의 편의성을 높이고자 한다.

### References

- [1] 1985, Sikora, J.S. and Miranda, L.R., "Boundary Integral Grid Generation Technique," *AIAA-85-4088*.
- [2] 2000, Spekreijse, S.P. and Kok, J.C., "Semi-automatic Domain Decomposition based on Potential Theory," *NLR-TP-2000-366*.
- [3] 1991, Katz, J. and Plotkin, A., "Low-speed Aerodynamics: From Wing Theory to Panel Methods," *McGraw-Hill*.
- [4] 1991, Anderson, J.D., "Fundamentals of Aerodynamics," *McGraw-Hill*.
- [5] 2015, Pointwise, Pointwise User Manual, Pointwise, Inc.
- [6] 2009, Ansys, Fluent 12.0 User's Guide, Ansys, Inc.
- [7] 2009, Sa, J.-H., Kim, J.-W., Park, S.-H., Park, J.-S., Jung, S.N. and Yu, Y.-H., "KFLOW Results of Airloads on HART-II Rotor Blades with Prescribed Blade Deformation," *2nd International Forum on Rotorcraft Multidisciplinary Technology*, Seoul, Korea.
- [8] 1986, Braza, M., Chassaing, P. and Minh, H.H., "Numerical Study and Physical analysis of the Pressure and Velocity Fields in the near Wake of a Circular Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.165, pp.79-130.
- [9] 1991, White, F.M., "Viscous Fluid Flow," McGraw-Hill.
- [10] 1954, Roshko, A., "On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets," *NACA Report 1191*.
- [11] 1997, Cho, K.W. and Kwon, J.H., "A Study of the Generation of Mesh Interface Regions for Structured Overlapped Grids," *Korean Society for Computational Fluids Engineering Spring conference*, 1997.5, pp.222-228.