Hybrid Particle-Mesh 방법에 적합한 다중영역 방법

이 승 재,^{*1} 서 정 천^{1,2}

¹서울대학교 해양시스템공학연구소

²서울대학교 조선해양공학과

A MULTI-DOMAIN APPROACH FOR A HYBRID PARTICLE-MESH METHOD

Seung-Jae Lee^{*1} and Jung-Chun Suh^{1,2}

¹Research Institute of Marine System Engineering, Seoul National University

²Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

A hybrid particle-mesh method as the combination between the Vortex-In-Cell (VIC) method and penalization method has been achieved in recent years. The VIC method, which is based on the vorticity-velocity formulation, offers particle-mesh algorithms to numerically simulate flows past a solid body. The penalization method is used to enforce boundary conditions at a body surface with a decoupling between body boundaries and computational grids. The main advantage of the hybrid particle-mesh method is an efficient implementation for solid boundaries of arbitrary complexity on Cartesian grids. However, a numerical simulation of flows in large domains is still not too easy. In this study, a multi-domain approach is thus proposed to further reduce computation cost and easily implement it. We validate the implementation by numerical simulations of an incompressible viscous flow around an impulsively started circular cylinder.

Key Words : 다중영역(Multi-domain), 하이브리드 입자-격자 방법(Hybrid particle-mesh method), 페널티화 방법(Penalization method), 전산유체역학(CFD), 비정상유동(Unsteady Flow), 순간 출발하는 실린더 (impulsively started circular cylinder)

1. 서 론

라그랑지안 보텍스 방법(Lagrangian vortex method)은 기본적으로 Navier-Stokes 방정식을 따라 와도 입자의 생성, 이동, 확산 과정을 추적하는데, 세부 알고리즘에 따라 다양한 종류로 나누어진다. 보텍스 방법은 초기에 Lighthill[1]과 Bachelor[2]에 의해 연구가 되었으며, Sarpkaya[4]는 많은 연구자들에 의해 개발된 다양한 보텍스 방법(Lagrangian or mixed Lagrangian-Eulerian schemes, the Biot-Savart law or the Vortex-In-Cell (VIC) methods)을 소개하였다.

와도를 기저로 하는 보텍스 방법은 비관성 및 관성 좌표계에서의 지배 방정식 형태가 같다. 또한 와도가 나타나는 물체 근처의 한정된 계산영역을 택할 수 있으며, 무한 원방 조건이

자동으로 만족된다는 점에서 비정상 유동해석에서 적합하다. 보텍스 방법은 유동의 물리현상에 기초한 비교적 간단한 알고리즘으로 구성되기 때문에 복잡한 비정상 유동 해석에 유리하다. 하지만 일부 적분항에 대한 계산시간이 상당히 소요된다는 점이 수치기법의 정확도를 높이는 데 어려움이 있다.

보텍스 방법의 주된 문제는 속도-와도 관계식인 Biot-Savart 적분에 많은 시간이 소요되는 것과 수치기법에서 물체 표면에서의 속도 고착조건이 만족되도록 물체표면에서의 와도 값을 효과적으로 결정하는 것이다. 와도가 유지하는 속도를 계산하기 위한 Vortex-In-Cell (VIC) 방법[7]은 Biot-Savart 적분에 의한 것보다 계산시간을 현저히 단축한다. VIC 방법은 유동장에 위치한 와도 입자를 직교 좌표계로 내삽(interpolation)한 후, 정규격자상에서 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)를 이용하여 와도의 이동 속도를 계산한다. Penalization 방법은 표면에서의 고착조건과 비침투 조건을 동시에 만족시키는 방법으로 Angot et al.[6]이 penalty 항의 타당성을 수학적으로 증명한 이후 다양한 수치 기법에서 응용되고 있다.

본 연구에서 사용된 VIC 방법과 Penalization 방법은 보텍

Received: February 27, 2014, Revised: June 16, 2014,
Accepted: June 16, 2014.

* Corresponding author, E-mail: hul94@snu.ac.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.2.072

© KSCFE 2014

스 입자의 세기와 속도가 모두 일시적인 정규격자계에서 계산이 이루어지기 때문에 hybrid particle-mesh 방법이라고 할 수 있다. Hybrid particle-mesh 방법은 병렬계산의 도입과 더불어 보텍스 방법의 계산 시간을 단축하는데 매우 효과적이다. 하지만 고 레이놀즈수의 계산을 위해서는 더 많은 계산시간 단축과 가용 컴퓨터 메모리의 효율적인 활용이 요구된다.

본 논문에서는 비정상 점성유동을 VIC 방법과 penalization 방법을 기반으로 해석하며, 메모리의 효율적인 활용과 계산시간의 단축을 위해 다중영역(multi-domain) 방법을 소개한다. 본 논문에서 제안하는 다중영역방법은 와도가 분포하는 곳에 격자계를 위치시키며 격자의 크기를 서로 달리 할 수 있기 때문에 계산시간의 단축과 메모리의 효율적인 이용에 있어 큰 장점이 될 수 있다. 2장에서 지배방정식과 사용된 수치기법을 간단히 소개한다. Hybrid particle-mesh 방법은 3장에서 상세히 기술되며, 유동해석결과는 4장에서 보여준다. 본 논문에서는 순간 출발하는 2차원 실린더에 대한 점성유동해석 수행하여 제안된 방법을 검증하고자 한다.

2. 지배 방정식

2차원 비압축성 점성 유동장에서 보텍스방법은 이산화된 와도장을 표현하는 보텍스 입자를 기본 요소로 한다. 와도장은 N 개의 보텍스 입자 순환세기($\Gamma = \omega h^2$)와 순정함수(η_ϵ)를 이용하여 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\omega(x, t) = \sum_{i=1}^N \Gamma_i \eta_\epsilon(x - x_i) \quad (1)$$

보텍스 입자의 성장과 이동은 식 (2)와 (3)에서와 같이 라그랑지안 개념으로 표현된다.

$$\frac{Dx}{Dt} = \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \nu \nabla^2 \omega \quad (3)$$

2.1 Vortex-In-Cell 방법

점성유동 입자의 속도($\mathbf{u} = \mathbf{U}_\infty + \mathbf{u}_w$)는 유입 속도 $\mathbf{U}_\infty$ 와 와도가 유기하는 회전 속도 $\mathbf{u}_w$ 로 구성된다. 회전속도 성분을 얻기 위해서 유량함수와 와도 간의 Poisson 방정식 $\nabla^2 \psi = -\omega$ 을 먼저 계산하여 유량함수(ψ)를 얻은 후, 관계식 $\mathbf{u} = \nabla \times \psi$ 에 의해 속도를 구한다. 또한, Dirichlet 경계조건을 사용하기 위해서 경계에서의 유량함수는 Green 함수의 해를 이용하여 구할 수 있다.

VIC 방법에서 유량함수와 속도의 계산은 정규격자계에서 수행되며, 와도 값은 식 (4)에 의해 정규격자계로 내삽된다.

$$\omega_g = \sum_p \omega_p W\left(\frac{\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_g}{h}\right) \quad (4)$$

여기서 아래첨자 p 와 g 는 각각 와도 입자와 격자 상의 물리량을 의미하며, W 는 내삽가중함수(interpolation kernel function)로 0차, 1차, 2차 모멘트가 보존되는 M_4' kernel 을 사용한다 [10,12,13].

$$W(x) = M_4' = \begin{cases} 1 - \frac{5}{2}|x|^2 + \frac{3}{2}|x|^3, & |x| \leq 1 \\ \frac{1}{2}(2 - |x|)^2(1 - |x|), & 1 < |x| < 2 \\ 0, & 2 \leq |x| \end{cases} \quad (5)$$

정규격자상에서 구해진 속도 성분은 다시 식 (4)를 이용하여 입자 위치에서의 속도를 구한다.

2.2 Penalization 방법

표면 고차조건을 만족시키기 위한 penalty 항이 추가된 Navier-Stokes 방정식은 식 (6)과 같다.

$$\frac{D\omega}{Dt} = \nu \nabla^2 \omega + \nabla \times [\lambda \chi(\mathbf{u}_s - \mathbf{u})] \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{u}_s$ 는 물체의 속도이다. χ 는 mask 함수로서 물체 안에서는 1이고 물체 밖에서는 0이 된다. λ 는 penalty 상수로서 매우 큰 값이어야 한다. Explicit 방법에서 λ 는 $1/\Delta t$ 로 정의하며 λ 가 매우 큰 값을 갖기 위해서는 Δt 가 과도하게 작아야 하기 때문에 implicit penalty 항을 이용한 와도 이송방정식을 사용하며 식 (7)과 같다[8,13].

$$\frac{D\omega}{Dt} = \nu \nabla^2 \omega + \nabla \times \left[\frac{\lambda \chi}{1 + \lambda \Delta t \chi} (\mathbf{u}_s^n - \mathbf{u}^n) \right] \quad (7)$$

확산항은 보텍스입자의 성장을 표현하며, penalty 항은 물체 표면에서의 고차조건을 만족하도록 물체 근처의 입자 세기를 변경한다. 보텍스 입자의 속도 계산과 같이, 입자 세기는 모두 정규격자계에서 구해지며, 변경된 세기는 입자위치로 다시 내삽된다. 보텍스 입자들은 얻어진 속도에 따라 이동하게 되며, 시간 전진은 다음과 같이 midpoint predictor-corrector 방법을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i^* &= \mathbf{x}_i^n + \Delta t \mathbf{u}_i(\mathbf{x}_i^n, \Gamma^n) \\ \Gamma^{n+1} &= \Gamma^n + \Delta t \frac{d\Gamma_i}{dt}(\mathbf{x}_i^n, \Gamma^n) \\ \mathbf{x}_i^{n+1} &= \mathbf{x}_i^n + \frac{\Delta t}{2} (\mathbf{u}_i(\mathbf{x}_i^n, \Gamma^n) + (\mathbf{u}_i(\mathbf{x}_i^*, \Gamma^{n+1}))) \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 1 Multigrid strategy; Ω_c and Ω_f denote coarse and fine meshes, respectively

Fig. 2 Schematic illustration of Grid-to-Particle interpolation; Red line indicates the decision boundary to interpolate values at particle position whether from the coarse grids or from the fine grids

3. 다중영역(Multi-domain) 방법

Hybrid particle-mesh 방법에서 다중격자를 사용하기 위해서는 정규격자의 격자간격과 보텍스 입자 크기를 바탕으로 내삽이 이루어져야 한다. 격자간격과 보텍스 입자 크기가 서로 다를 경우, 식 (4)는 식 (9)와 같이 다시 정의된다.

$$\omega_g = \frac{\epsilon^2}{h^2} \sum_p^N \omega_p W\left(\frac{\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_g}{h}\right) \quad (9)$$

여기서 ϵ 은 보텍스 입자의 크기이며, h 는 정규격자계의 격자 크기이다. 이때, 전체 순환 세기는 보존된다.

Fig. 1과 같이 구성된 두 개의 정규격자에 보텍스의 세기가 내삽 되며, 각각의 격자계에서 속도와 보텍스 세기가

Fig. 3 Flow chart showing proposed strategy to use the hybrid particle-mesh method with the multigrid approach

계산된다. 유량함수와 와도간의 Poisson방정식 계산에 필요한 경계조건은 Dirichlet 조건을 사용하며, 각각의 정규격자계의 경계에서의 유량함수는 모든 보텍스 입자를 가지고 계산되어야 한다. 본 연구에서 제안된 방법은 필요한 경계조건을 직접 계산하기 때문에 격자크기가 큰 격자계가 작은 격자계를 포함하지 않아도 되며, 이는 입자 분포에 따라 격자계의 위치를 쉽게 조절할 수 있는 장점을 갖는다. 또한 두 격자계가 서로 같은 격자 크기를 갖을 수도 있으며 보텍스 입자 분포에 따라 두개 이상의 격자계를 쉽게 구현할 수 있다. 두개의 격자계 중에서 물체 후류에 위치한 격자계는 앞의 격자계가 포함하지 않은 보텍스 입자를 모두 포함하도록 격자계의 범위가 변경된다.

격자계에서 계산된 보텍스 입자의 속도와 세기는 다시 입자 위치에서의 값으로 내삽되며, Fig. 2와 같이 입자의 위치에 따라 내삽할 격자계를 선택한다. 내삽은 식 (9)에 의해서 이

Fig. 4 Domain and particle decomposition for parallel computing

루어지기 때문에 보텍스 입자의 위치에서 내삽에 필요한 모든 격자점을 포함하고 있는 격자계가 선택된다. 본 연구에서 제안한 다중영역방법은 서로 다른 격자간의 내삽이 없기 때문에 작은 격자크기를 갖는 격자계가 큰 격자크기의 격자계에 포함될 필요가 없으며, 이는 격자계의 위치를 좀 더 자유롭게 해주어 효율적으로 계산 영역을 정의할 수 있으며, 컴퓨터 메모리의 사용량을 크게 줄일 수 있다.

Fig. 3는 다중격자계와 hybrid particle-mesh 방법을 사용한 유동 해석의 전체 알고리즘을 도시한 것이다. 유입류의 속도, 레이놀즈 수, 와도 입자의 크기와 정규격자계의 격자 크기에 관한 상수 값들이 결정으로 계산 환경을 결정한다. 유동 해석을 하고자 하는 대상체에 대한 모델링을 한다. Penalty 항에 의해 물체 주위의 와도값이 결정되기 때문에 판 요소법과 같은 추가적인 유동해석은 요구되지 않는다. 보텍스 입자들이 서로 너무 멀어지거나 뭉쳐지지 않도록 몇 번의 시행마다 보텍스 입자를 재분배(re-distribution)한다. 보텍스 입자의 재분배는 식 (9)를 사용하여 보텍스 입자 크기와 동일한 격자 간격을 갖는 격자계에 내삽한다. 이때의 격자계는 보텍스 입자를 모두 포함하여야 한다. 균일한 간격으로 재분배된 보텍스 입자는 그 세기에 따라 선택되며, 본 연구에서는 최대 보텍스 입자세기의 0.01% 이상의 세기를 갖는 보텍스 입자를 선택하였다. 순환세기 보존을 위해 제거된 입자들의 세기의 합은 선택된 입자들로 입자 세기에 비례하여 나누어준다.

유동해석을 병렬컴퓨터를 사용하였으며, 계산 속도와 컴퓨터 메모리의 효과적인 사용을 위해 domain decomposition 방법을 사용하였다[6]. 정규격자계는 병렬 컴퓨터 수에 맞게 나누어지며, Fig. 4와 같이 격자계에 포함된 보텍스 입자들은 각각의 프로세스에 나누어 저장된다. 시간 전진에 따라 보텍스 입자가 프로세스가 담당하는 정규격자계를 벗어날 경우에는 이웃한 프로세스로 이동되어 저장된다.

4. 유동해석 결과

본 연구에서는 hybrid particle-mesh 방법과 다중영역법을 이용하여 순간적으로 출발하는 2차원 실린더 주위의 점성유동

(a) Single resolution

(b) Multi resolution

Fig. 5 Instantaneous vorticity iso-contours for an impulsively started circular cylinder for $Re = 550$ at $T = 5$. Note that solid box represents the fine-grid domain which is not varied as time increases

을 해석해 보았다. 이 문제는 단순하고 명확한 형상이면서도 복잡한 유동 특성을 포함하고 있기 때문에 수치기법 검증에 위한 기준 문제로서 적합하다. 또한, 순간 출발하는 물체 주위의 유동은 발달 초기에는 상대적으로 3차원 특성이 크지 않기 때문에 많은 연구자들은 순간 출발하는 실린더의 발달 초기 유동을 수치해석의 대상으로 하여 수치기법을 검증하고 결과를 비교하고 있다.

4.1 유동해석 $Re = 550$

레이놀즈수 550에 대한 유동해석을 수행하였으며, 유동해석을 위한 입력변수는 Table 1과 같다. Fig. 5는 순간적으로 출발하는 2차원 실린더 주위의 와도장을 나타낸 것이다.

Table 1 Computational parameters for $Re = 550$

Reynolds number	550
Cylinder radius	0.5
Time step, Δt	0.002
Particle size, ϵ	0.006
Grid spacing, h	ϵ (fine), 2ϵ (coarse)
Number of particles	Approx. 100,000 at $T=5$ Approx. 270,000 at $T=15$ Approx. 350,000 at $T=20$
Computational time [hrs] (8 Intel Xeon64 3.3GHz)	upto $T=5$: 1.4(single) / 0.8(multi) upto $T=15$: 21(single) / 8(multi) upto $T=20$: 40(single) / 16(multi)

Fig. 6 Comparison of streamline patterns for $Re = 550$ at $T = 5.0$ Fig. 7 Instantaneous vorticity iso-contours for an impulsively started circular cylinder for $Re = 550$ at $T = 15$. Note that solid box represents the fine-grid domain which is not varied as time increases

다중영역법을 사용한 것과 단일격자계를 사용한 결과의 차이는 거의 없었으나 계산시간은 다중영역방법에 의해 약

Fig. 8 Time evolution of the drag coefficient for $Re = 550$

60% 단축되었다.

Fig. 6는 다중영역방법에 의해 계산된 와도-속도장을 바탕으로 계산된 유선(streamline)을 보여준다. $T=5$ 에서의 계산 결과는 Bouard and Coutanceau[3]의 실험결과와 비교되었다.

Fig. 6에서와 같이 뒷 정점(stagnation point)로부터 45° 부근에서 발생하는 secondary vortex가 본 논문의 방법으로 잘 묘사되었으며, 이러한 현상은 소위 bulge 현상[3]으로 불린다. 계산된 첫 번째 후류 보텍스의 무차원 위치 (a, b)는 $a/D = 0.34$ 와 $b/D = 0.27$ 이며, Bouard and Coutanceau의 실험에서 얻어진 $(a/D, b/D) = (0.36, 0.28)$ 와 잘 일치하며 단일 격자계를 사용한 결과와의 차이는 거의 없었다. 또한 후류 보텍스의 길이 L/D 는 0.82로 계산되었으며, Bouard and Coutanceau의 실험값 0.85와 비교하여 잘 일치한다. Bouard and Coutanceau의 실험결과를 수치해석 기법을 검증하는 목적으로 많은 연구에서 활용되고 있으며, 본 연구의 결과는 다양한 수치해석기법에 의한 결과[5,10,11,12]와도 잘 일치하였다.

Fig. 7은 $T = 15$ 에서의 와도장을 비교한 것으로 단일격자계와 다중격자계를 사용하여 계산된 결과와 차이는 거의 없었으나, 후류로 갈수록 와도장이 상대적으로 빠르게 확산되고 있다. Fig. 8은 단일격자계와 다중격자계를 사용하여 계산된 실린더의 항력을 보여준다. 격자 크기를 보텍스 입자크기의 2배를 사용한 다중격자계의 결과는 단일격자계의 결과와 매우 잘 일치하고 있으나, 격자 크기를 보텍스 입자크기의 4배를 사용한 다중격자계의 경우에는 초기에는 단일격자계의 결과와 잘 일치하고 있으나 시간이 지남에 따라 차이가 생기는 것을 알 수 있다. 이는 격자계가 과도하게 커질 경우 확산항 계산에서 발생하는 오차가 커지게 됨을 보여준다.

4.2 유동해석 $Re = 185$

장시간에 걸친 유동해석을 통하여 본 논문에서 제안된 다중영역법을 검증하고자 레이놀즈수 185에 대해서 격자 크기

Fig. 9 Instantaneous vorticity iso-contours an impulsively started circular cylinder for $Re = 185$ at $T = 100$. Note that dotted box represents the fine-grid domain which is not varied as time increases.

를 보텍스 입자크기의 2배를 사용한 다중격자계를 사용하여 유동해석을 수행하였다. 가용 컴퓨터 메모리의 한계로 인해 단일격자계에 의한 유동해석을 수행할 수 없었다. 해석에 필요한 입력변수는 Table 2와 같다.

Fig. 9은 순간적으로 출발하는 2차원 실린더 주위의 와도장을 보여준다. 2차원 원형 실린더 주변 유동에서 발생하는 와류홀름(vortex shedding) 현상의 주기성이 잘 묘사되었으며, Fig. 10은 장시간 동안의 실린더에 발생하는 항력과 양력을 보여준다. 양항력 값은 Table 3에서 다른 연구자에 의해 계산된 결과와 비교하였다. Strouhal 수는 다른 수치해석 결과와 잘 일치하고 있으나 항력이 상대적으로 작게 계산되고 있다.

양력과 항력의 오차의 원인은 경계조건이 엄밀히 만족하지 못하고 있기 때문으로 생각된다. Penalization 방법에서 양력과

Fig. 10 Time evolution of drag and lift coefficients for $Re = 185$

항력은 식 (10)과 같이 Penalty 항을 적분하여 계산될 수 있다 [6,12].

$$F_s = -\rho \int_{\Omega} \chi \frac{\mathbf{u}_s^n - \mathbf{u}^n}{\Delta t} d\Omega \quad (10)$$

결국, 물체 내부의 가상의 속도 성분의 합에 의해 항력과 양력이 구해진다. 물체 내부의 가상의 속도는 물체 표면에서의 경계 조건인 고착조건(no-slip boundary condition)과 비침투조건(no-penetration boundary condition)을 만족하기 위해 생성된 물체 내부의 와도에 의해 유지된다. 경계조건에 대한 보다 엄밀한 만족을 위해서는 물체 내부의 와도세기를 보다 면밀하게 계산되어야 하며, 반복계산(iteration) 방법[9,13]과 같이 경계조건이 엄밀히 만족되기 위한 수치기법 개발이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 와도를 기저로 하는 hybrid particle-mesh 방법에 적합한 다중영역방법을 제안하였다. Hybrid particle-mesh

Table 2 Computational parameters for $Re = 185$

Reynolds no,	185
Cylinder radius	0.5
Time step, Δt	0.01
Particle size, ϵ	0.015
Grid spacing, h	ϵ (fine), 2ϵ (coarse)
Number of particles	Approx. 80,000 at $T=100$
Computational time, [hours] (8 Intel Xeon64 3.3GHz)	62 hours

Table 3 Drag and lift coefficients and Strouhal number

Authors	C_D	$C_{L,rms}$	St
Williamson(1988)	-	-	0.193
Gu et al.(1994)	1.28	-	0.19
Guilmineau and Queutey[8]	1.287	0.443	0.195
Huang and Huang[14]	1.38	0.51	0.195
Present	1.25	0.45	0.197

* Results of Williamson(1988) and Gu et al.(1994) are extracted from the work of Huang and Huang[14].

방법은 병렬계산의 도입과 더불어 와도를 기저로 하는 보텍스 방법의 계산 시간을 크게 단축하였다. 하지만 고 레이놀즈 수 유동 또는 3차원 유동 해석을 위해서는 가용 컴퓨터 메모리의 보다 효과적인 활용과 더 많은 계산시간 단축이 요구되고 있다. 이러한 요구에 따라 본 연구에서는 계산영역을 분할하여 유동해석을 수행하는 다중영역방법을 제안하였으며, 2차원 순간적으로 출발하는 원형실린더에 대한 유동해석을 통하여 제안된 방법의 타당성을 확인하였다. Rasmussen et al.[12]의 multiresolution 방법은 계산영역을 상위격자(parent grid)에서 하위격자(child grid)로 나누는 것으로, 물체 주위에서 보다 세밀한 격자를 이용하여 계산할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 최상위 격자계는 보텍스 입자 전체를 포함하여야 하고 하위 격자계는 상위격자계에 포함되어야 한다. 반면, 본 연구에서 제안한 다중영역방법은 사용되는 격자계가 서로 분리되어 있기 때문에 보텍스 입자가 분포된 전체 영역을 다수의 격자계로 나누어 계산할 수 있다. 사용되는 격자계들의 격자간격은 동일하거나 서로 다르게 조절 할 수 있는 장점이 있다. $Re=3000$ 과 9500 에 대해서도 만족할 만한 결과를 얻었으며, 다중영역방법의 적용으로 인해 계산시간이 50~60%정도 단축되었다. 계산시간은 병렬계산에 사용되는 노드수와 보텍스 입자 분포에 따라 다소 차이가 있다.

본 연구에서 제안한 다중영역방법은 궁극적인 연구 목적인 고 레이놀즈수 유동 또는 3차원 유동 해석을 위해 개발되었으며 해석시간 단축과 가용 컴퓨터 메모리의 효율적 사용에 매우 효과적임을 확인하였다. 본 연구의 수치기법은 2차원 물체를 대상으로 개발되었으나 3차원 유동해석에 적용하기 위한 알고리즘의 확장은 큰 어려움이 없을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업융합원천기술개발사업 과제와 한국해양과학기술원 산업원천과제의 지원으로 진행되었습니다. 많은 지원에 감사 드립니다.

References

- [1] 1963, Lighthill, M. J., *Introduction, boundary layer theory, Laminar boudanry layers*, edited by J. Rosenhead, Oxford University Press, New York, pp.54-61.
- [2] 1967, Batchelor, G. K., *An intriduction to fluid dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] 1980, Bouard, R., and Coutanceau, M., "The early stage of development of the wake behind an impulsively started circular cylinder for $40 < Re < 104$," *J. Fluid Mech.*, Vol.101, pp.586-607.
- [4] 1989, Sarpkaya, T., "Computational methods with vortices: the 1988 freeman scholar lecture," *J. Fluids Eng.*, Vol. 111(1), pp.5-52.
- [5] 1995, Koumoutsakos, P.D., and Leonard, A., "high-resolution simulations of the flow around an impulsively started cylinder using vortex methods," *J. Fluid Mech.*, Vol.296, pp.1-38.
- [6] 1999, Angot, P., Bruneau, C.-H., and Fabrie, P., "A penalization method to take into account obstacles in incompressible viscous flows," *Numer. Math.*, Vol.81, pp.497-520.
- [7] 2000, Cottet, G.-H. and Koumoutsakos, P. D., *Vortex methods: theory and prattice*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [8] 2002, Guilmineau, E., and Queutey, P., "A numerical simulation of vortex shedding from an oscillating circular cylinder," *J Fluid Struct.*, Vol.16, pp.773-794.
- [9] 2005, Lee, S.-J., "Numerical simulation of single dynamics with two-way coupling using the Lagrangian vortex method," *Ph.D Thesis*, Seoul National University.
- [10] 2007, Liu, Q., and Vasilyev, O.V., "A Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries," *J. Comput. Phys.*, Vol.227, pp.946-966.
- [11] 2010, Cottet, G.-H., Gallizio, F., Magni, A., and Mortazavi, I., "A vortex immersed boundary method for bluff body flows," *Proceedings of 3rd Joint US-European ASME Fluids Enigneering Summer Meeting, Sympoisum on Development and Applications of Immersed Boundary Methods*, Canada.
- [12] 2011, Rasmussen, J.T., Cottet, G.-H., and Walther, J.H., "A multiresolution remeshed vortex-in-cell algorithm using patches," *J. Comput. Phys.*, Vol.230, pp.6742-6755.
- [13] 2012, Kim, Y.-C., Suh, J.-C., and Lee, K.-J., "Vortex-in-cell method combined with a boundary element method for incompressible viscous flow analysis," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol.69, pp.1567-1583.
- [14] 2013, Huang, C.-H. and Huang M.-J., "A vortex method suitable for long time simulations of flow over body of arbitrary geometry," *Computers & Fluids*, Vol.74, pp.1-12.