

레벨셋법을 이용한 이동 집중격자 생성법에 대한 연구

박일룡*, 전호환**

A Study on a Moving Adaptive Grid Generation Method Using a Level-set Scheme

Il-Ryong Park* and Ho-Hwan Chun**

요 약

Eulerian개념을 사용한 격자계 내 임의의 경계면 주위 점성유동 해석에서, 운동하며 변형하는 경계면 근방 해의 정도를 향상시키기 위해서 격자생성시 경계면으로 격자점들을 집중시켜주는 레벨셋법에 바탕을 둔 격자변형법을 도입하였다. 본 연구에서는 격자점들을 경계면 근방으로 집중되는 정도를 용이하게 조절할 수 있도록 새로운 형태의 모니터함수를 제시하였다. 집중격자계를 사용함으로써 얻어지는 향상된 해의 정도의 검증은 위하여 바닥에 고정된 반원 실린더 주위 정상유동에 대하여 가상경계법을 함께 사용하여 해석하였다. 수치계산결과는 물체적합 격자계를 사용해서 얻은 결과와 매우 잘 일치하였으며, 집중격자법을 사용하지 않은 해석결과보다 향상된 결과를 보여주었다. 수치계산의 또 다른 예제로서 다수의 고정된 물체주위 유동해석으로 확장 적용하여 공학적 유용성을 검증하였다. 마지막으로 이동 집중격자계의 생성법의 적용을 위해서 움직이면서 변형을 일으키는 2차원 기포상승문제를 해석하였다. 수치해석결과에서 격자점들은 매시간 기포의 변형에 맞추어 적합하게 집중된 형태를 잘 보여주었으며, 고정된 격자계를 사용한 결과와 잘 일치하였다.

※Keywords: 이동집중격자(moving adaptive grid), 레벨셋법(level-set method), 모니터함수(monitor function), 가상경계법(immersed boundary method), 점성유동(viscous flow)

Abstract

In order to improve the accuracy of the solution near the boundary in an analysis of viscous flow around an arbitrary boundary which move and be deformed using an Eulerian concept, a level-set based grid deformation method is introduced to concentrate grid points near the boundary. This paper presents a new monitor function which can easily control the level of the concentration of grid points along the boundary.

Computations for steady flow around a semi-circular cylinder mounted on the bottom of the flow domain were carried out to check the improvement of the solution using the

접수일자: 2001년 3월 22일, 승인일자: 2002년 7월 2일

* 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 (E-mail: irpark@kriso.re.kr)

** 중신회원, 부산대학교 조선해양공학과(기계기술연구소)(E-mail: chunahh@pusan.ac.kr)

adaptive grid system with an immersed boundary method. The present numerical results show a good agreement with the solutions obtained by a body fitted grid system and more accurate solutions than those computed with non-adaptive grid system. For the validation of mechanical usefulness of the present method, an expanded analysis of flow around multi-body fixed in the flow domain was carried out. Finally, the present moving adaptive grid method was applied to a two-dimensional bubble rise problem. The computed results show well adapted grid points around the boundary of the bubble at every time and a good agreement with the result calculated by fixed grid system.

1. 서언

임의 형상을 가지는 물체주위의 점성 유동해석은 물체의 물리적 경계면과 계산 격자계의 격자 경계면과 일치하는 정렬 또는 비정렬 물체적합격자계(body fitted grid system)를 주로 사용하고 있다. 또한 현재까지 이와 같은 계열의 수치기법을 위해서 매우 발달된 격자 생성법들이 개발되어 오고 있다. 특히 국내의 선박유체역학분야에서는 김우전 등(1999)이 복잡한 상선주위 난류유동해석을 위한 격자생성법을 연구하였다. 이진태 등(1999)의 연구보고서를 살펴보면 김우전 등이 개발한 격자생성법을 사용한 선박주위의 난류유동해석의 결과는 과거 타 연구자들보다 매우 향상된 수치해석결과를 보여주고 있다. 또한 이를 유동해석 프로그램과 함께 상용화를 하였다.

다른 한편으로는 물리적 경계면과 계산 격자 경계면이 일치하지 않는 해석방법들에 대한 연구들이 또한 활발하게 진행되어 오고 있다. 여기에 속하는 수치해석법들은 비교적 간단하며 단순한 정렬 또는 비정렬 격자계를 사용하면서 Eulerian개념에 바탕을 둔 해석법들이다. 변형이 없고 고정된 물체주위, 또는 움직이면서 변형을 일으키는 물체 또는 임의 여러 유체의 경계면 주위 유동해석을 보다 용이하게 하기 위해서 이에 대한 많은 연구들이 활발히 진행되고 있다(Mittal et al. 1999, Calhoun et al. 2000, Marcus et al. 1994, Udaykuma et al. 1997, LeVeque/Li 1994, Fadlun et al. 2000, Cortez 1996, Stokie/Wetton 1999, Saiki/Biringen 1996, Goldstein 1993, Guojun et al. 2000)

문헌에서 살펴볼 수 있는 Eulerian방법들은 물체가 운동하거나 변형을 일으키는 문제를 해석할 경우 적용하기 용이한 방법들이며 공학적인 응용성이 뛰어난 방법들로 볼 수 있다. 그러나 이들 방법들 중에서 물체적합격자계를 사용한 계산결과와 비슷한 수준의 정도를 가지는 방법들도 있지만, 여기에 해당하는 대부분의 해석법들에 의해서 얻어진 결과들을 살펴보면 경계면 근방에서 해의 정확도가 물체적합격자계를 사용해서 얻은 해보다 비교적 낮은 편이다.

본 논문에서는 앞서 설명한 Eulerian 개념에 바탕을 둔 방법들로 물체 주위 유동 또는 두 유체가 형성하는 경계면의 움직임을 해석할 경우 경계면 근방의 해의 정도를 개선하기 위한 이동 집중격자 생성법에 관한 연구를 수행하였다. 집중격자 생성을 위해서 레벨셋(level-set)법 개념을 사용한 집중격자 생성법(Guojun et al. 2000)을 도입하였다. 본 연구에서는 집중격자 변형형태의 변화의 폭을 넓히기 위하여 새로운 형태의 모니터 함수를 도입하였다. 움직이면 변형을 일으키는 경계면 주위로 시간변화에 따라 집중격자를 생성하기 위한 이동 집중격자 생성에 관한 알고리즘을 간략히 설명하였다.

레벨셋법에 바탕을 둔 격자변형법을 사용함으로써 얻어질 수 있는 향상되는 해의 정도의 검증을 위하여 바닥에 고정된 반원 실린더 주위 정상유동 해석을 가상경계법(Immersed Boundary Method)을 사용하여 해석하였다. 수치계산의 또 다른 예제로서 다수의 고정된 복잡한 물체주위 유동해석으로 확장하여 적용하였다.

시간의 변화에 따라 움직이면서 변형을 일으키

는 문제에 본 방법을 응용하기 위해 2차원 기포상 승문제를 해석하였다.

유동장의 지배방정식을 풀기 위한 수치해석 기법은 비엇갈림 격자계와 SIMPLEC 알고리즘을 사용하는 유한체적법으로 해석하였다.

2. 집중격자 생성법

단순한 정규 격자계 내에 있는 임의의 경계면 근처로 격자점들을 집중시키기 위해서 다음 소개되는 레벨셋법의 개념을 이용한 집중격자 생성법을 사용할 수 있다.

좌표변환에서 (x, y, z) 영역에서 $\Phi = (x', y', z')$ 의 영역으로 변환할 때 Jacobian은 $J(\Phi) = \det \nabla \Phi = |dA'|/|dA|$ 이다. 여기서 A 는 3차원에서는 체적 그리고 2차원의 경우 면적을 나타낸다. 필요한 격자변형을 유도하기 위하여 다음과 같이 Jacobian과의 관계를 가지는 모니터 함수 $f(\Phi, t)$ 를 도입할 수 있다.

$$J(\Phi) = 1/f(\Phi, t) \tag{1}$$

각 격자점들이 가지는 변형속도 분포를 v_g 라고 할 때 이 속도분포는 모니터함수 f 와 아래와 같은 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$g_t + \nabla \cdot (g v_g) = 0 \tag{2}$$

여기서 $g = 1/f$ 이다.

식(2)를 풀기 위해서는 모니터함수 f 가 결정되어야 하는 데 레벨셋법의 개념(Sussman et al. 1997)을 이용하여 적절히 결정할 수 있다. 우선 모든 격자점에서 계산영역 내부의 임의의 경계면으로부터 안쪽은 음의 거리 값 그리고 바깥쪽 방향은 양의 크기의 거리의 값을 갖는 레벨셋함수 분포를 구한다. 경계면에서 레벨셋함수는 영의 값을 갖는다.

이와 같이 경계면 주위 거리의 함수로 표현된 레벨셋함수 분포를 사용하여 격자점들을 경계면 근방으로 이동하도록 조절할 수 있는 모니터함수 f 를 결정할 수 있다. 경계면 주위 레벨셋함수 분포를 사용한 Guojun et al.(2000)의 연구논문에 나타나 있는 모니터 함수 f 는 다음과 같다.

$$f = \begin{cases} 1-2t+2k(0.2-8d) & \text{if } -0.1 < d < 0 \\ 1-2t+2k(0.2+8d) & \text{if } 0 < d < 0.1 \\ 1 & \text{if } |d| > 0.1 \end{cases} \tag{3}$$

여기서 d 는 레벨셋함수이며, t 는 시간을 나타낸다. 예제에 사용된 기준 되는 계산영역의 크기는 $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ 이다.

식(3)과 같은 모니터 함수는 경계면 근방으로 격자점들을 집중시키는 정도의 조절이 제한적이기 때문에 실제적인 응용을 위해서는 다른 형태의 모니터함수로 변형을 시켜 사용할 필요가 있다. 본 연구에서는 모니터 함수를 제어하는 상수의 변화에 따라 격자변화가 너무 민감하여 비현실적이 되지 않으며, 또한 제어 상수의 값만으로 격자 집중률이 예상되어지는 여러 가지 형태의 모니터 함수를 수치 시험을 거친 후 다음과 같이 결정하였다.

$$A = 0.8/0.2^B$$

$$B = \lambda (0.2 - 0.2/0.2^2 |d|^2)$$

$$f = \begin{cases} 1-2t+2k(0.2+A|-d|^B) & \text{if } -0.1 < d < 0 \\ 1-2t+2k(0.2+A|d|^B) & \text{if } 0 < d < 0.1 \\ 1 & \text{if } |d| > 0.1 \end{cases} \tag{4}$$

Fig. 1은 본 논문과 Guojun et al. (2000) 의 모니터함수 값의 변화를 시간과 경계면에서의 거리 d 에 대해서 비교하여 보여주고 있다. 본 논문에서 제시하는 모니터함수의 변형형태는 Guojun et al.(2000)이 사용한 선형적인 변형형태와는 다른 형태를 보여주고 있다. 상수 λ 의 값을 조절하여 집중도를 변화시킬 수 있으며 큰 값을 가질수록 집중도가 커진다. 모니터함수가 결정되면 격자점들의 변형속도 v_g 에 대해서 식(2)로부터 다음의 포와종(Poisson) 방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot (g v_g) = -g_t \Rightarrow \nabla^2 w = -g_t \tag{5}$$

여기서 $w = (g v_g)$ 이다.

포와종 방정식(5)의 해로서 격자점들의 변형속도를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$v_g = \nabla w / g \tag{6}$$

구해진 격자 변형속도 분포를 이용하여 다음의 방정식을 풀어서 새롭게 변형된 격자점들을 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_t(x, y, t) + \langle \nabla \phi, v_g \rangle &= 0 \\ \phi_t(x, y, t) + \langle \nabla \phi, v_g \rangle &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

이후 본 논문에서는 격자생성과 유동해석문제는 2차원 문제만을 취급하였다.

계산의 예로서 계산영역이 $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ 일 경우 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi(x, y, 0) &= x, \psi(x, y, 0) = y, \text{ at } t = 0 \\ \phi(0, y, t) &= 0, \phi(1, y, t) = 1, \\ \psi(x, 0, t) &= \psi(x, 1, t) = x \\ \psi(x, 0, t) &= 0, \psi(x, 1, t) = 1, \\ \psi(0, y, t) &= \psi(1, y, t) = y \end{aligned} \quad (8)$$

집중격자생성의 예제로서 계산영역의 크기는 $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ 이며, 계산영역의 중심에 원점을 둔 반경 0.3 원의 경계 근방으로 격자점들을 집중시키는 문제를 선택하였다. 앞서 설명한 바와 같이 본 논문에서 제시하는 모니터 함수는 상수 λ 에 따라 격자의 집중도를 조절할 수 있는데 Fig. 2에서 Guojun et al.(2000)의 모니터함수를 사용한 결과와 비교하여 나타내었다. 상수 λ 의 값이 커지면서 격자점이 경계면의 법선 방향으로 넓게 집중되는 것을 알 수 있다.

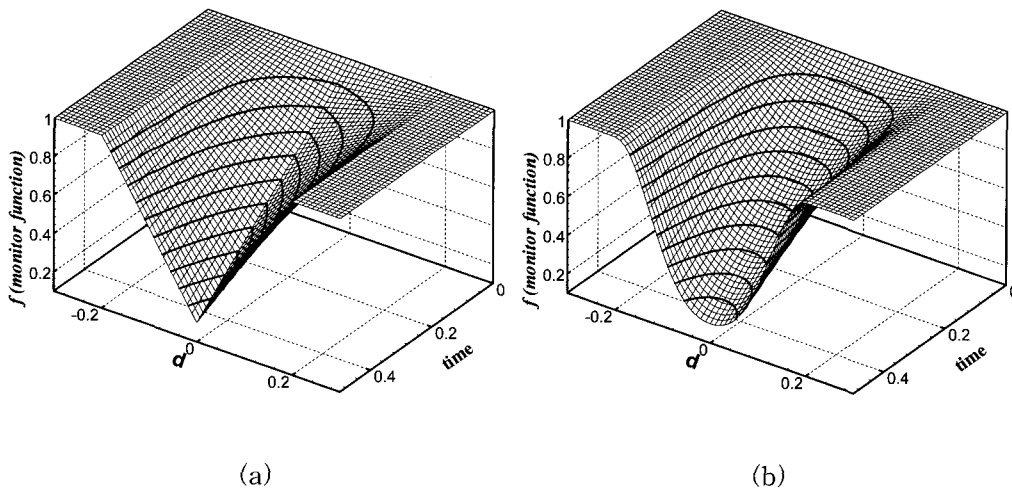


Fig. 1. Behaviors of monitor functions: a) monitor function(Guojun, 2000), b) present modified monitor function

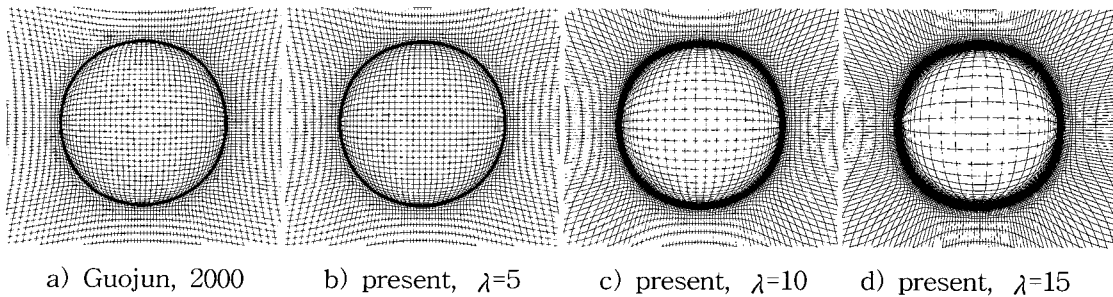


Fig. 2. Comparison of adaptive grids around a circular cylinder computed using the present modified monitor function and Guojun's

3. 이동 집중격자 생성 알고리즘

앞서 설명한 집중격자 생성법을 사용하여 움직이면서 변형을 일으키는 경계면의 주위로 함께 이동하는 집중격자를 생성할 수 있다. 이동 집중격자 생성법에 대한 알고리즘은 Fig. 3에 나타난 흐름도와 같다. 간략히 설명하면 다음과 같다. 시간에 대해 이동하거나 변형된 경계면 주위로 새롭게 변형된 격자계를 만든다. 새로운 격자계의 모든 점에서 물리량을 내삽하여 결정한 후, 구하고자 하는 변수 U 에 대한 유동방정식의 지배방정식을 생성된 새로운 집중격자계를 사용하여 해석한다. 다음 계산단계에서 문제의 성격에 부합하는 경계면의 거동을 새롭게 계산한다. 이러한 과정을 시간변화에 따라 반복하게 된다.

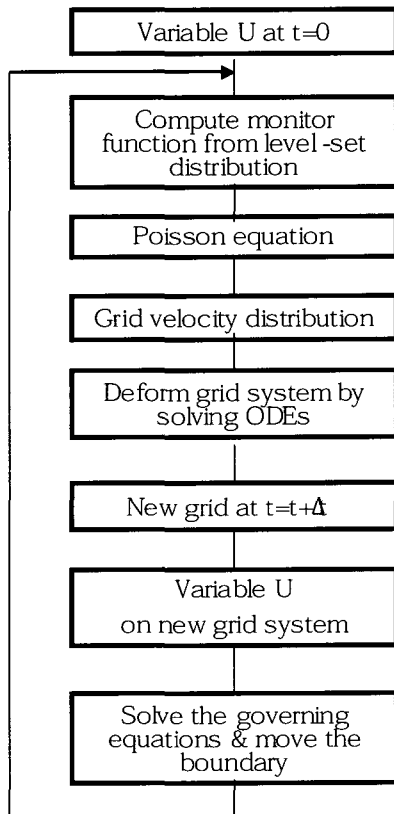


Fig. 3. Flow chart of calculating a moving adaptive grid generation

4. 집중격자를 사용한 유동해석 결과

집중격자 생성법을 적용한 유동해석의 예제 중 첫 번째는 집중격자를 사용한 유동해석결과의 개선정도를 살펴보기 위해 유장의 바닥에 돌출된 반원형상 물체주위 정상유동계산이다. 두 번째 예제로서 'CFD' 글자 형태를 가지는 유동장에 고정되어 있는 복잡한 다수의 물체주위 비정상 점성유동 해석을 수행하였다. 마지막으로 움직이면서 경계면의 형상이 변하는 문제에 본 논문의 이동 집중격자 생성법을 적용한 유동계산으로서 2차원 기포 상승에 대한 점성유동해석을 수행하였다.

4.1 수치해석기법(가상경계법, 레벨셋법)

임의의 물체주위의 유체의 운동은 다음의 연속방정식과 비압축성 Navier-Stokes 방정식에 의해 지배되는 것으로 가정할 수 있다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \mu \Delta \mathbf{u} - \nabla p + \mathbf{F} \quad (9)$$

여기서 $\mathbf{u}(x, t)$ 는 $(u(x, t), v(x, t))$ 인 속도벡터를 나타내고, $p(x, t)$ 는 압력 그리고 $\mathbf{F}(x, t)$ 는 외력항을 각각 나타낸다. ρ, μ 는 유체의 밀도와 점도이다.

유동장 중에 고정 또는 이동 그리고 변형을 하는 물체의 위치를 $x = X(s, t)$ 로 정의할 수 있다. 여기서 s 는 물체의 경계면을 따르는 경로를 나타낸다. 유동장 가운데 존재하는 물체의 정보와 움직임과 변형 등은 물체 경계면 상의 외력성분을 사용한 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F}(x, t) = \int_{\Gamma} f(s, t) \delta(x - X(s, t)) ds \quad (10)$$

여기서 $\delta(x) = \delta(x) \delta(y)$ 인 두 방향의 Dirac delta함수의 곱을 나타내며, $f(s, t)$ 는 물체의 움직임과 변형에 따라 정의할 수 있는 경계면에서의 외력성분을 나타낸다.

이러한 외력이 적용된 물체경계조건을 만족시키는 가상경계법에 대한 자세한 설명과 이산화 방법은 (Goldstein et al. 1993)을 참조할 수 있다.

세 번째 유동해석 예제인 기포의 거동은 레벨셋법을 사용하여 해석하였다. 지면과 문장전개상 상세한 내용은 생략하였으며, 문헌(Sussman et al. 1997, 강국진 1996, 박일룡/전호환 1999(a), 박일룡/전호환 1999(b))에서 상세한 내용을 참고할 수 있다.

지배방정식은 Ferziger/Perić(1996)방법의 유한체적법으로 이산화하여 해석하였다. 대류항은 1차 정도의 상류차분법과 2차 정도의 중앙차분법을 혼용하는 hybrid방법을 사용하여 이산화하였다. 속도와 압력의 연성을 위해서 SIMPLEC알고리즘을 도입하였으며, 시간적분은 Implicit Euler법을 사용하였다.

4.2 돌출된 반원주위 유동계산

유동장 $0 \leq x \leq 4m$, $0 \leq y \leq 1m$ 의 바닥에 고정되어 있는 반원의 반경은 $0.25m$ 이며 레이놀즈 수는 $Re = 50$ 이다. 사용된 격자수는 100×25 , 150×38 , $200 \times 50 CV_s$ (control volumes)이며,

수치계산결과를 비교하기 위해 사용된 물체적합격자계에 의한 계산에서의 격자수는 $150 \times 50 CV_s$ 이었다. 유동장의 각 경계면에서의 경계조건은 Fig. 4와 같다.

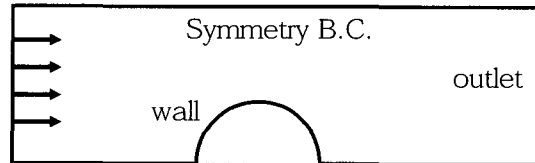


Fig. 4. Definition sketch of flow around a semi-circular cylinder mounted on the bottom of the flow domain.

Table 1은 물체 경계면에서는 각 방향의 유속 (u_b, v_b)이 없어야 된다는 조건에 대한 오차를 다음의 식으로 계산하여 서로 비교하였다.

$$\epsilon_{body} = \sqrt{\frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} (u_b)_i^2} \quad (11)$$

Table 1 Comparison of errors in body boundary condition (ϵ_{body})

gridsize	no adaptive		level-set adaptive grid	
	U_b	V_b	U_b	V_b
100×25	4.9810E-3	2.6842E-3	1.0915E-3	4.7924E-4
150×38	3.3602E-3	1.6550E-3	5.6226E-4	2.7315E-4
200×50	2.8444E-3	1.3458E-3	3.5166E-4	1.7993E-4

Table 2 Comparison of values of difference between the computed velocity field using the present method and body fitted grid method (ϵ_{domain})

gridsize	no adaptive		level-set adaptive grid	
	U	V	U	V
100×25	4.0703E-2	1.1231E-2	9.6153E-3	4.3343E-3
150×38	3.2424E-2	9.1404E-3	9.3337E-3	3.5688E-3
200×50	2.0007E-2	6.8289E-3	7.3202E-3	3.2795E-3

Table 1에서 물체의 경계면 주위로 집중격자를 생성하여 계산된 결과를 살펴보면, 사용하지 않은 경우보다 모든 격자수의 계산조건에서 경계 조건이 더욱 잘 만족되는 것을 보여주고 있다.

Table 2는 물체적합격자계를 사용하여 계산한 결과와 전체 유동장에서 속도분포들을 서로 비교하여 차이의 정도를 다음의 식으로 계산하여 비교한 도표이다.

$$\epsilon_{domain} = \sqrt{\frac{1}{N_x N_y} \sum_{i,j=1}^{N_x N_y} (u_{i,j} - u_{i,j}^{body\ fitted\ grid})^2} \quad (12)$$

Table 2에서도 유동영역에 대한 속도분포 비교 결과들은 집중격자계를 도입한 계산결과가 도입하지 않은 결과보다 한 차수 정도 높은 해의 정확성을 보여주고 있다.

Fig. 5는 Table 1과 2에서 보여진 집중격자계를 사용했을 때 얻어진 해의 정도향상을 계산된 속도성분의 등고선을 서로 비교하여 볼 수 있도록 하였다. 경계면 근방에서 약간의 차이가 있으나 서로 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.

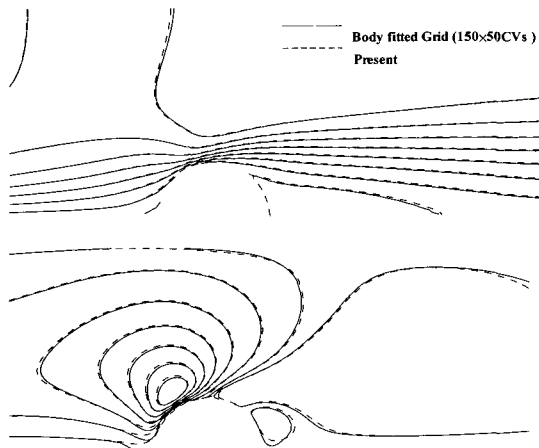


Fig. 5. Velocity contours compared with the result of body fitted grid (upper: u-velocity, lower: v-velocity)

4.3 복잡한 다수 물체주위 유동계산

복잡한 형상을 가진 여러 물체 주위 유동해석을 통해 본 논문에서 제시하는 방법의 유용성과 공학

적 다양한 응용가능성을 가능하여 보았다. 수치계산 대상은 Fig. 6에 나타난 유동에 대한 개념도에서 볼 수 있는 'CFD'의 글자의 형상을 가지는 복잡한 3개의 물체이며, 레이놀즈수 $R_D = 450$ 의 조건에서 유동해석을 수행하였다. 아래첨자 D 는 글자 'F'의 균일유속 방향, 즉 x 방향의 폭(= $0.45m$)을 대표길이로 하였음을 나타낸다.

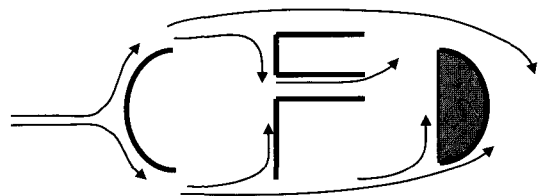


Fig. 6. Definition sketch of flow around multibody

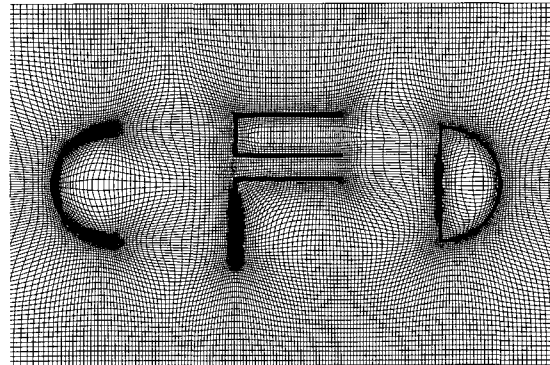


Fig. 7. Partial view of the adaptive grid around multi-body

Fig. 7은 집중격자 생성법으로 만들어진 격자분포모습을 보여주고 있다. 수치계산에 사용된 유장의 크기는 $0 \leq x \leq 5m$, $0 \leq y \leq 1.6m$, 격자수는 $200 \times 100 CVs$ 이다.

이 경우의 유동장은 비정상 상태를 보이며 어느 순간의 와류분포 형태를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 물체주위의 유동들이 각각의 물체들의 영향으로 복잡한 형태를 보이고 있다. 와류와 와류 그리고 와류와 물체들의 상호작용들을 잘 관찰할 수 있다. 특히 글자 'C, F'는 내부의 밀폐된 부분을

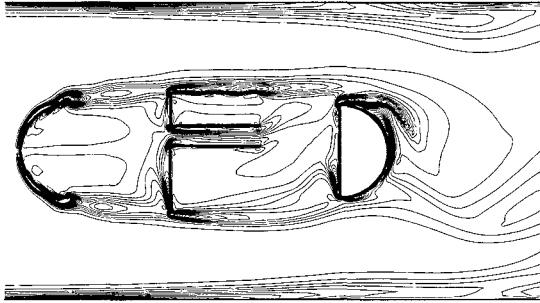


Fig. 8. Calculated vortex contours around multibody at $R_D=450$

가지고 있지 않고 경계의 구분만이 있으나, 이러한 물체 경계의 특성을 잘 반영한 결과를 보이고 있음으로부터 알 수 있다.

본 논문에서 사용한 가상경계법은 집중격자계를 도입하지 않은 경우 물체경계면 바로 근처에서는 1차 정도의 해를 갖는다. 다른 많은 연구자들에 의해 수행되고 있는 가상경계법에 대한 연구의 목표는 이러한 물체경계면 바로 근방에서 2차 정도 이상의 해를 얻는데 있으며, 현재로서는 비교적 단순한 문제에 대해 2차 정도의 해를 구할 수 있는 복잡한 수치해석법, 예를 들면 LeVeque/Li(1994)의 ‘immersed interface method’라 불리는 방법 등이 있다. 본 논문에서는 지배방정식을 비교적 단순하게 이산화하는 가상경계법을 사용하면서, 물체근방에서 2차 정도는 아니지만 1차 정도 이상의 해를 얻기 위해 집중격

자계를 도입하였다. 향후, 관련 연구에서는 본 방법을 도입한 경우 해의 차수 증가 정도를 수치로 엄밀히 계산하여 비교할 계획이다.

4.4 2차원 기포주위 유동계산

기포상승문제에서 유동조건은 밀도비 $\rho_l/\rho_g=909.1$, 점도비 $\mu_l/\mu_g=117.65$, 그리고 표면장력 계수 $\sigma=2.771\text{dynes/cm}$ 를 사용하였으며, 기포 반경은 $R_o=1/6\text{ cm}$ 이다. 기포는 $1\times 2\text{ cm}$ 의 달린 계산영역의 (0.5 cm , 0.75 cm)의 위치에서 정지 상태에서 시간이 흐르면서 기포가 상승하면서 변형한다. 모든 유동영역 경계면의 경계조건은 유속이 없다는 조건을 부여하였다. 수치해석에 사용된 격자수는 $60\times 100\text{ CV}_s$ 이며 계산시간 간격은 0.00004 sec 로 하였다.

Fig. 9는 본 방법으로 계산된 각 시간단계에서 기포의 변형모습을 보이고 있다. 또한 움직이며 변형되는 기포 경계면에 맞추어 이동하며 생성된 집중격자의 모습을 잘 보이고 있다.

Fig. 10은 동일한 유동조건에서 집중격자계를 사용하지 않은 격자수 $100\times 200\text{ CV}_s$ 로 계산한 기포 변형모습과 이동 집중격자법을 적용한 결과를 비교하여 보여주고 있다. 기포의 좌우부분에서 약간의 차이가 있지만 만족스런 일치성을 보여주고 있다.

기포거동해석을 위해서 사용된 레벨셋방법은 두

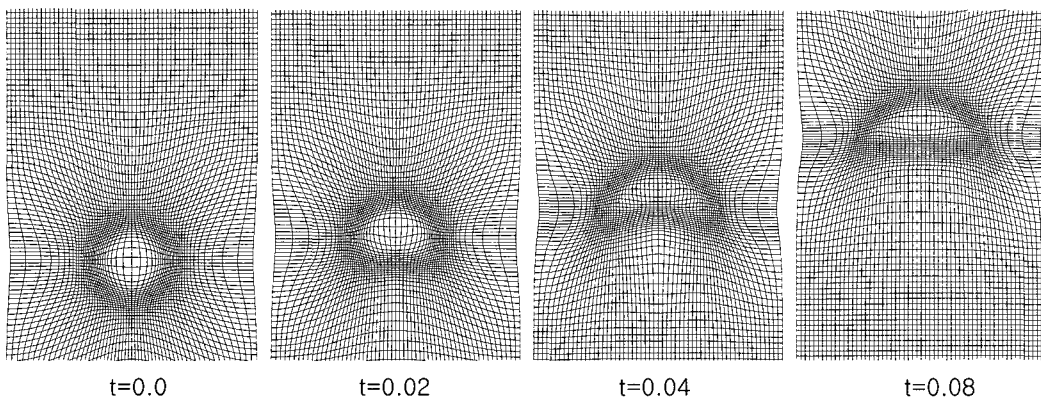


Fig. 9. Calculated moving adaptive grid around a rising bubble at four time instants, $t=0.0$, $t=0.02$, $t=0.04$, $t=0.08$

유체의 큰 밀도차이로 발생하는 수치적 불안속성을 없애기 위해서 경계면 주위로 격자간격 2~4배의 물리량 연속적 변화구간을 필요로 한다. 레벨셋방법은 두 유체의 경계면 근방으로 매우 균일한 격자분포를 가질 때 신뢰도가 높은 해를 얻을 수 있다. Fig. 10에서 볼 수 있는 두 해의 차이는 경계면 근방의 격자분포 균일성의 차이로 발생한 것으로 생각되어 진다.

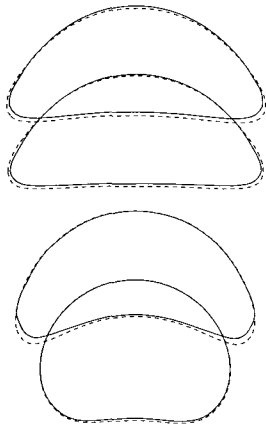


Fig. 10. Bubble shapes compared with the computed results using fixed grid system at four time instants, $t=0.0$, $t=0.02$, $t=0.04$, $t=0.08$ (dashed line: fixed grid result, solid line: moving adaptive grid result)

5. 결론

본 연구에서는 레벨셋법에 바탕을 둔 집중격자계 생성법을 사용하여 이동하며 변형하는 경계면 근방으로 집중격자를 생성하는 방법을 소개하였다. 본 연구에서는 집중격자생성을 위한 새로운 형태의 모니터 함수를 소개하였으며, 집중격자의 변형 형태의 폭을 넓혔다.

집중격자계를 사용한 유동해석 예제에서는 보다 정확한 계산결과를 보여주었다. 기포거동 유동해석문제의 결과에서는 시간에 따라 격자점들이 경계면과 함께 이동하며 경계면 근처로 잘 집중된 형태를 보여주었다.

앞으로 3차원 문제에서의 검증과 함께 운동과 변형을 일으키는 구조물의 해석에 본 방법을 적용하여 해의 정도를 검증하고 공학적 이용의 유용성에 대해 더욱 연구해야할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- 강국진 1996 "Zero-level-set 방법을 사용한 자유표면파 계산," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp.237-240
- 김우전, 김도현, 반석호 1999 "선체주위의 점성 유동계산을 위한 3차원 공간격자계 생성방법," 대한조선학회논문집, 제36권 1호, pp.70-81
- 박일룡, 전호환 1999(a) "유한체적법에 의한 자유수면 유동해석에서 level-set기법에 대한 연구," 대한조선학회논문집, 제36권 2호, pp.40-49
- 박일룡, 전호환 1999(b) "접수와 이수문제에서 강체주위 유동해석," 대한조선학회논문집, 제36권 4호, pp.37-47
- 이진태, 김우전, 반석호, 신명수, 김도현 1999 "대형고속 특수선 유체성능 핵심기술개발(III)/유체성능해석시스템개발(II)," 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 연구보고서
- Calhoun, Donna and LeVeque, Randall, J. 2000 "A Cartesian Grid Finite-Volume Method for the Advection-Diffusion Equation in Irregular Geometries", *Journal of Computational Physics*, 157, pp.143-180.
- Cortez Ricardo 1996 "An Impulse-Based Approximation of Fluid Motion due to Boundary Forces", *Journal of Computational Physics*, 123, pp.341-353.
- Fadlun, E. A., Verzicco, R., Orlandi, P., and Mohd-Yusof, J. 2000 "Combined Immersed Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flow Simulations", *Journal of Computational Physics*, 161, pp.35-60
- Ferziger, J. H., and Perić, M. 1996 *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Berlin
- Goldstein, D., Handler, R., and Sirovich, L. 1993 "Modeling a No-Slip Boundary with an

External Force Field", Journal of Computational Physics, 105

- LeVeque, R. J., and Li, Z. 1994 "The Immersed Interface Method for Elliptic Equations with Discontinuous Coefficients and Singular Sources", SIAM J. Num. Anal., 31, pp.1019-1044

- Liao, Guojun, Liu, Feng, de la Pena, Gary C., Peng, Danping, and Osher, Stanley 2000 "Level-Set-Based Deformation Methods for Adaptive Grids", Journal of Computational Physics, 159, pp.103-122

- Marcus, S. Day, Phillip, Colella, Micheal, J. Lijewski, Charles, A. Rendleman, and Daniel, L. Marcus 1994 "Embedded Boundary Algorithms for Solving the Poisson Equation on Complex Domains", Report 65N55, 33J05, 94C15, Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, CA, 94720

- Mittal, T. Ye., Udaykumar, H. S., and Shyy, W. 1999 "An Accurate Cartesian Grid Method for Viscous Incompressible Flows with Complex Immersed Boundaries", Journal of Computational Physics, 156, pp.209-240.

- Saiki, E. M., and Biringen, S. 1996 "Numerical Simulation of a Cylinder in Uniform Flow: Application of a Virtual Boundary Method", Journal of Computational Physics, 123, pp.450-465

- Stokie, John, and Wetton, Brian R. 1999 "Analysis of Stiffness in the Immersed Boundary Method and Implications for Time-Stepping Schemes", Journal of Computational Physics, 154, pp.41-64.

- Sussman, M., Fatemi, E., Smereka, P., and Osher, S., 1997 "An Improved Level Set Method for Incompressible Two-Phase Flows," Computers and Fluids, Vol.27, No.5-6, pp.663-680

- Udaykuma, H. S., Kan, Heng-Chuan, Shyy, Wei, and Tran-Son-Tay, Roger 1997

- Multiphase Dynamics in Arbitrary Geometries on Fixed Cartesian Grids", Journal of Computational Physics, 137, pp.366-405.



< 전 호 환 >



< 박 일 룡 >