2005년도 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집

ALE모델을 갖는 차분격자볼츠만법에 의한 이동물체 주위의 유동장 및 유동소음의 직접계산

강호근[+]·Tsutahara M.[++]·김명호[+++]·김유택[++++]·이영호[+++++]

Direct Simulation of Flows and Flow Noise around Moving Body by FDLBM with ALE Model

Ho Keun Kang+, Tsutahara M.++, Myoung Ho Kim+, Yu Taek Kim+++ and Young Ho Lee+++

Abstract : In this paper, flowfield and acoustic-field around moving bodies are simulated by the Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) formulation in FDLBM. The effect of the ALE is checked by comparing flow about a square cylinder in ALE formulation and that in the fixed coordinates, and the results show good agreement. Matching procedure between the moving grid and fixed grid is also considered. The applied method in which the both grids are connected through buffer zone is shown to be superior to moving overlapped grid. Dipole-like emissions of sound wave from harmonically vibrating bodies in 2- and 3-dimensional cases are simulated.

Key words : inite Difference Lattice Boltzmann Method(차분격자볼츠만법), Arbitrary Lagrangian Eulerian Formulation (ALE법), Acoustic Wave(음파), Moving Body(이동물체)

1. 서 론

LBM 또는 FDLBM은 이산적인 속도 분포를 갖는 입자의 분포함수의 시간 발전을 계산하는 것에 의하여 열·유체 운동을 시뮬레이션 한 것으로, 근래 그 응용 분야가 넓어지고 있으며, 많은 연구[1] 및 해설서도 출판되게 되었다. 공학적으로 유체기계에서의 팬 등과 같이 회전날개와 케이싱 또는 지주와 같이 정지한 물체가 가까이에 존재할 경우, 소음 및 유동장의 정확한 예측을 위해 그 상호 작용을 명확하게 해명하는 것이 중요해질 경우가 많다. 이러한 목적에 응용하기 위한 기초연구로서, 본 연구에서는 FDLBM에 ALE법[2]을 적용하여 이동물체 주위에서 계산한 결과에 관하여 보고한다. 또한, 압축성 유체 모델을 이용하여 진동물체 주위의 흐름에 적용하며, 발생하는 공력음도 양호하게 파악한 것을 할 수 있다는 것을 보고한다. 위와 같은 경우들을 고려하고 이동 좌표와 정지 좌표와의 접합을 시도한다. 이동 격자와 정지 격자의 접합에는 중첩 격자를 이용한 경우가 많지만, FDLBM에 적용하여 시도한 예는 거의 보이질 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 양자의 경계만으로 접합을 행하여, 유동장 및 음장 모두해석이 가능하다는 것을 확인하였다.

2. 이론해석

ALE법은 이동물체 또는 혼상류 해석과 같이 경계 또는 계면이 이동한 경우에 매우 유효한 수법으로서, 유동장을 Euler적으로 나타내지만, 이용되어지는 격자는 이동 경계에 대응하고 공간을 이동하여 Lagrangian적으로 취급한다. 본 연구에서는 격자의 변형을 고려하지 않고 격자의 평행이동 및 회전만을 고려하기 때문에, 수송방정식에 대해서는 이동하는 유체의 속도를, 유속과 격자의 이동속도와의 상대적인 속도로 바꾸는 것에 의하여 간단하게 정식화된다. 또한, 경계조건은 이동물체이라면 이동속도에 대응하는 속도를 부여한다. 이산화 BGK방정식의 경우, 입자 분포함수에 있어 이동하는 유체의 속도에 대응한 것은 입자의 이동속도이다. 따라서 FDLBM의 방정식에 ALE법을 적용하면

$$\frac{\partial f_i}{\partial t}+(c_{i\alpha}-V_\alpha)\frac{\partial f_i}{\partial r_\alpha}-\frac{A c_{i\alpha}}{\phi}\frac{\partial (f_i-f_i^{(0)})}{\partial r_\alpha}=-\frac{1}{\phi}(f_i-f_i^{(0)}) \quad (1)$$

와 같다. 여기서 ϕ는 단일시간완화계수, i는 입자의 운동 방향을, $f_i^{(0)}$ 는 국소 평형 분포 함수를 나타낸다. 또한, 좌변 제 2항의 V는 격자의 이동속도를, 좌변 제3항은 입자속도를 포함하지만, 이 항은 위에서 언급한 봐와 같이 점성항이며, 입자가 이동하는 항이 아니기 때문에 이 항에는 상기의 변환을 적용하지 않는다. 식(1)을 Chapmann-Enskog전개를 하여 정리하면 다음과 같은 NS방정식들을 얻을 수가 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial r_\alpha}[\rho(u_\alpha-V_\alpha)]=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_\alpha)+\frac{\partial}{\partial r_\beta}[\rho u_\alpha(u_\beta-V_\beta)+p\delta_{\alpha\beta}] -\frac{\partial}{\partial r_\beta}\left[\mu\left(\frac{\partial u_\beta}{\partial r_\alpha}+\frac{\partial u_\alpha}{\partial r_\beta}\right)+\lambda\frac{\partial u}{\partial r_r}\delta_{\alpha\beta}\right]=0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(e+\frac{u^2}{2}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial r_\alpha}\left[\rho(u_\alpha-V_\alpha)\left(e+\frac{u^2}{2}\right)+pu_\alpha\right] -\frac{\partial}{\partial r_\alpha}\left[k^*\frac{\partial e}{\partial r_\alpha}+\mu u_\beta\left(\frac{\partial u_\beta}{\partial r_\alpha}+\frac{\partial u_\alpha}{\partial r_\beta}\right)+\lambda u_\alpha\frac{\partial u_\beta}{\partial r_\beta}\right]=0 \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 일정속도로 이동하는 입방체 주위의 유동장

ALE 법을 적용한 모델의 효과를 조사하기 위해 그림 1에 나타난 봐와같이 한 변 L을 갖는 입방체 주위의 유동장 계산을 행한다. 계산에는 3차원 직각격자를 이용하였으며, 계산영역은 x, y, z 방향으로 각각 $60L\times60L\times60L$, 격자수는 $51\times51\times51$를 설정한다. 여기서 Case 1 및 Case 2는 일정 속도 U에서의 갈릴레이 변환 (Galilei transformation)의 관계이고, Case 2에 대하여서만 ALE법을 적용하며, 식(2)에 있어서 V는 일정한 값 U로 된다. 흐름 시작 또는 입방체가 움직이기 시작하고 나서, 무차원 시간$T(tU/L)=2$에 있어 양자의 계산 결과를 비교한다. Fig. 2에서 입방체의 중심 $(x,y,z)=(0,0,0)$ 을 통과하는 x 방향의 직선, 즉 x 축상의 압력분포 (a) 및 y,z 축상의 압력변동 (b)의 분포를 나타내고 있다. 그림중의 실선은 Case 1에서의 압력분포를, 흑점은 Case 2의 결과를 나타내고 있으며, 양자 모두 매우 잘 일치함을 알 수가 있다. Fig. 3은 입방체의 중심의 $x-z$ 단면내에서의 압력 분포의 등압선을 나타내고 있다. 물체 또는 흐름이 갑자기 반응하고 있기 때문에 입방체 주위에 강한 압력파와 팽창파가 보여지며, 양자 압력분포의 패턴이 매우 잘

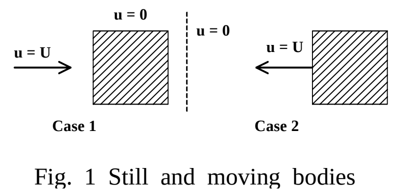


Fig. 1 Still and moving bodies

+ 강호근(경상대학교 기계·항공공학부),E-mail:kanghokeun@chol.com, Tel: 055)640-3064
++ Michihisa Tsutahara, Kobe대학교 기계공학과
+++ 김명호, 경상대학교 대학원
++++ 김유택, 한국해양대학교 기관시스템공학부
+++++ 이영호, 한국해양대학교 기계·정보공학부

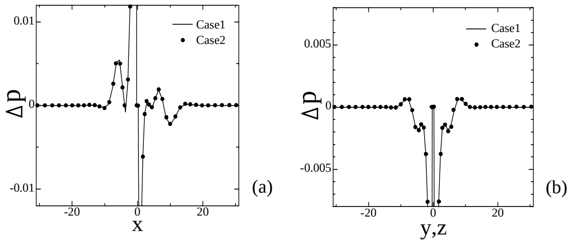
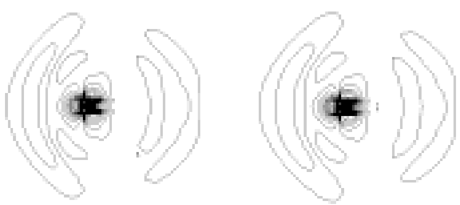


Fig. 2 Distribution of pressure fluctuation



(a) Case 1 (b) Case 2

Fig. 3 Temperature contours in two-opposite wall

일치를 보이고 있다.

3.2 이동격자와 정지격자와의 접합

이동물체와 근접한 정지 물체와의 상호 작용을 조사하기 위하여 우선, 각각의 물체에 대하여 이동격자 (moving grid) 및 정지격자(still grid)를 이용하여, 이러한 것들의 접합을 검토할 필요가 있다[3]. 따라서 이동격자 및 정지격자의 경계만으로 양자의 접합을 행하고, 양 수법에 관한 비교를 행한다. 또한, FDLBM에 있어서 버퍼영역(buffer layer)을 사용한 방법이 중첩격자 (overlapped grid)를 이용하는 방법과 비교하여 ALE법을 적용한 수법이 유효한 것을 나타낸다.

Fig. 4에 나타낸 봐와같이 한 변이 L인 2차원 정방형이 원점을 중심으로 x 방향으로 단진동 하는 경우를 고려한다. 이와 같은 현상은 현 등이 진동하는 경우에서 음파의 방사 현상과 비슷하다. 여기에서는 정방형과 동시에 이동하는 직각격자와 상측의 정지격자를 설정하며, 계산격자는 151×151, 계산영역은 $101L\times 101L$를 고려하였다. 본 연구에서는 2 종류의 접합방법에 관하여 검토한다. 먼저 제 1의 방법은 중첩된 격자(overlapped grid)를 이용하는 방법이다. Fig. 5 (a)는 경계 부근에서의 격자의 모식도를 나타내고 있다. 경계의 상측이 정지격자이며, 하측이 이동격자를 의미한다. 정방형의 중심이 원점에 있을 때, 상하에서 격자점은 경계상에서 서로 간에 일치한다. 그러나 중심이 원점으로부터 떨어지면, 양자의 격자점은 경계상에서 그림과 같이 엇갈려 있다. 여기서 공간에 대하여 3차정도의 풍상차분으로 고려하면, 경계로부터 상하로 2격자점 즉, 그림의 점선으로 표시된 가상 격자선과 실선으로 표시된 격자선의 교점에서의 분포함수 f_i의 값을 알면, 양 영역의 계산치가 접합된다. 이 가상 격자점상에서 분포함수의 값을 매 시간 스텝마다 x 방향의 근접한 격자점 5점을 취하고 4차 다항식으로 근사를 행한다. 제 2의 방법은, 그림 Fig. 5 (b)에 나타난 봐와 같이 경계의 이동격자 측에 1격자분의 버퍼영역(buffer layer)을 설정한다. 이동격자와의 어긋남은 완충영역에서 실선으로 표시한 격자에 해당하며, 이 부분만 격자의 성질이 변한 것으로 취급한다. 이 경우는 버퍼영역에 해당하는 부분만 직각 격자가 아니게 되며, 때문에 이 부분은 격자의 좌표변환을 수행하여야 한다. 격자의 변형을 가능한 한 작게 하기 위해, 격자의 연결은 그림중의 점선으로 나타낸 것처럼, 가장 근접의 것과 조합시킨다. 즉, 그림에서 점선으로 표시된 상하 격자를 접합시킨다.

한편, 정방형 중심은 $x = l_0 sin(2\pi ft)$로 단진동한다. 여기에서 l_0는 진폭, f는 무차원 주파수, $f = f^* L/c_s$, 로 정의되며, f^*는 진동의 주파수이고, c_s는 음속이다. 따라서 식(2)에서의 격자의 속도는 $V = 2\pi f l_0 cos(2\pi ft)$로 움직이게 된다. Fig. 6에 $l_0 = 0.001$, $f = 0.1$로 설정 했을 때의, 정방형의 중심을 통과하는 x 축 (a) 및 y 축 (b) 상의 압력 분포, 즉 음압 분포를 나타내고 있다. 각각의 실선은 영역 전체가 정방형과 동시에 이동한 경우의 값으로 격자의 이음매는 보이질 않는다. 점선은 중첩격자(overlapped)에 의한 것이며, 흑점은 좌표변환(buffer layer)에 의한 것이다. x 좌표상의 변화를 보면, 중첩격자 (점선)에서는 무시할 수 없는 오차가 생긴다. x 좌표는 전체가 이동격자에 포함되지만, 접합한 경계에서의 오차가 상류에도 영향을 주고 있는 것을 알 수가 있다. 한편 좌표변환에 의한 계산(흑점)에서는, 오차가 극히 작은 것을 알 수가 있다. 또한 y 축상의 압력분포의 변동은 x 축상 분포와 정성적으로는 비슷하지만 매우 작으며, 중첩 격자에 의한 상대적인 오차는 보다 크게 나타남을 알 수가 있다.

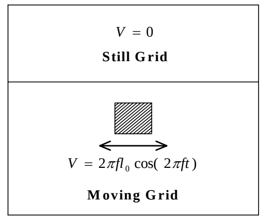
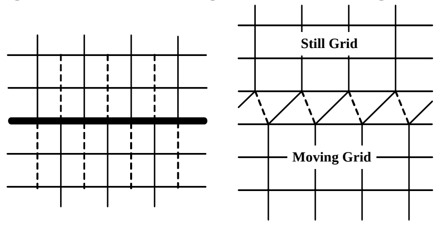


Fig. 4 Schematic diagram of vibrating body



(a) Overlapped grid (b) Grid with buffer layer

Fig. 5 Grid systems for two matching methods

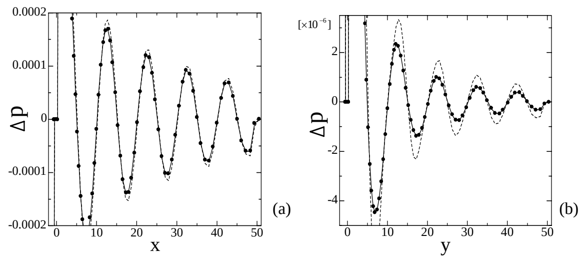


Fig. 6 Comparisons of pressure fluctuations obtained by two matching methods

4. 결 론

FLLBM에 ALE 법을 적용하여, 이동물체 주위의 유동장 및 유동소음을 전산모사 하였다. 또 정지 좌표계와 이동 좌표계와의 접합법에 관한 고찰을 행하였다. 우선, FDLBM에 ALE 법을 적용하여, 이동물체에 대한 유동장을 용이하게 해석 가능한 것을 나타냈다. 또한, 이동 격자와 정지 격자의 접합에, 중첩격자(overlapped grid)를 취급하는 것보다도, 버퍼영역을 설치하고 좌표 변환(buffer layer)을 행하여 전체를 1개의 격자계로서 취급한 방법이, 계산 시간 및 정도도 우수하였으며, 단진동 한 물체로부터의 음파의 2 중극의 방사가 잘 모사되었다.

참고문헌

[1] H. K. Kang, M. Tsutahara and S. T. Bae, "Numerical Prediction of Flow-induced Noises by the Finite Difference Lattice Boltzmann Model with Internal Degree of Freedom," 2nd Int. Conf. for Mesoscopic Method in Eng. and Sci., Hong Kong, 2005.

[2] C. W. Hirt, A. A. Amsden and J. I. Cook, “An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds,” J. Comp. Phys., Vol. 14, pp 227-253, 1974.

[3] P. Lallemand and L. S. Luo, "Lattice Boltzmann Method for Moving Boundaries," J. Comp. Phys., Vol. 84, pp. 406-421, 2003.