

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.7.441>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

가상경계 격자볼츠만법을 이용한 프로펠러의 유동특성해석 방법에 관한 연구

김 형 민^{*†}

* 경기대학교 기계시스템공학과

Numerical Technique to Analyze the Flow Characteristics of a Propeller Using Immersed Boundary Lattice Boltzmann Method

Hyung Min Kim^{*†}

* Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi Univ.

(Received February 5, 2016 ; Revised April 3, 2016 ; Accepted April 7, 2016)

Key Words: Immersed Boundary Lattice Boltzmann Method(가상경계 격자볼츠만법), Propeller(프로펠러)

초록: 프로펠러에 의한 추력은 유체의 유입 속도와 익의 회전속도에 의해 생성되며 그 성능을 전진비, 추력계수, 동력계수와 같은 무차원수로 나타내고 있다. 이 연구에서 회전체의 성능을 분석하기 위한 수치적 방법으로 STL형식의 회전체 형상을 인식할 수 있는 가상경계법을 적용한 격자볼츠만법을 제안한다. 이 가상경계법으로 프로펠러의 회전에 의한 유동을 구현하기 위해서 프로펠러의 표면 격자점에서 속도와 유동장의 격자점에서 유속의 차를 이용하여 계산한 체적력을 볼츠만방정식의 외력항으로 적용하게 된다. 제안한 방법을 검증하기 위하여 4개의 익을 가지고 있는 프로펠러를 이용해 레이놀즈수가 100, 500, 1000이고 전진비가 0.2~1.4일 때 유동해석을 수행하였으며 그 결과로 부터 전형적인 프로펠러의 성능특성을 얻을 수 있었다. 높은 레이놀즈수와 전진비를 갖는 유동에서 해석 안정성을 확보하기 위해서는 익의 표면에 구성한 최대 격자의 크기와 유동장에 구성한 격자 크기의 비가 3 이하로 유지해야 하며 충분히 긴 후류영역을 확보할 필요가 있다.

Abstract: The thrust force created by a propeller depends on the incoming flow velocity and the rotational velocity of the propeller. The performance of the propeller can be described by dimensionless variables, advanced ratio, thrust coefficient, and power coefficient. This study included the application of the immersed boundary lattice Boltzmann method (IBLBM) with the stereo lithography (STL) file of the rotating object for performance analysis. The immersed boundary method included the addition of the external force term to the LB equation defined by the velocity difference between the lattice points of the propeller and the grid points in the domain. The flow by rotating a 4-blade propeller was simulated with various Reynolds numbers (Re) (including 100, 500 and 1000), with advanced ratios in the range of 0.2~1.4 to verify the suggested method. The typical tendency of the thrust efficiency of the propeller was obtained from the simulation results of different advanced ratios. It was also necessary to keep the maximum mesh size ratio of the propeller surface to a grid size below 3. Additionally, a sufficient length of the downstream region in the domain was maintained to ensure the numerical stability of the higher Re and advanced ratio flow.

1. 서 론

설비분야에서 많이 이용되고 있는 팬이나 프로

펠러와 같은 터보기계를 설계하기 위해 수치 해석을 활용하는 사례가 점점 더 늘어 가고 있는 추세이다. 특히 수치적 모사 해석은 실험에 비해 그 결과를 빠르게 확인하고 다양하게 검토해 볼 수 있다는 장점을 가지고 있어 관련 산업체에서

[†] Corresponding Author, pius@kgu.ac.kr

는 터보기계의 구조해석을 통해서 내구성만을 검토하는 단계를 벗어나 CFD(Computational Fluid Dynamics) 상용소프트웨어를 도입하여 터보기계의 유동해석을 통해 성능분석과 실제 설계에 활용할 수 있는 관련 데이터베이스를 구축하는 등 설계 전반에 걸쳐 그 활용영역을 넓혀가고 있다.

익의 회전에 의해서 유체에 압력차를 만들고 유동을 일으키는 터보기계를 CFD를 이용해 해석할 때 Single Reference Frame(SRF)⁽¹⁾기법 또는 2개 이상의 상대운동이 있는 경우에는 Multi Reference Frame(MRF)기법이 주로 이용되고 있다. 이 방법은 계산영역에 익을 포함하고 있는 일정 공간을 회전공간으로 분할하고, 그 공간에 회전익 외형을 따라 조밀한 격자를 구성한 후 익과 함께 회전시켜 익의 회전을 모사하는 방법이다. 이 방법에서 해석결과의 정밀도와 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 과정중의 하나는 익을 포함하고 있는 회전공간을 익의 표면형상을 따라 격자를 구성하는 것이다. 또 구성된 격자는 해석결과의 정밀도에 직접적으로 큰 영향을 주기 때문에 연구자들은 이 과정을 수행하는데 전체 전처리 과정 중 약 70% 이상의 시간을 할애하고 있다.

최근에 새롭게 개발된 해석법 중 그 응용분야를 대한 활발한 연구가 진행되고 있는 것이 격자불쓰만법이다. 이 방법은 기존의 유동해석법과 달리 입자밀도분포의 확률적 확산을 통해 유동을 해석하는 방법으로 늦센수가 0.1보다 큰 마이크로 및 나노영역까지 해석이 가능한 방법으로 알려져 있어 이를 이용한 다중스케일 수치해석법⁽²⁾과 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있다.

계산영역에 구성된 각 격자점에서 입자 간의 상호작용에 의한 입자의 확률적 분포를 계산하여 유동을 해석하는 방법인 격자불쓰만법은 정육면체로 구성된 격자점에서 미리 정해진 방향으로 확산시킨 입자의 확률적 밀도분포함수 값을 이용하여 거시유동장의 물리량을 계산한다.

따라서 이 해석법을 이용한 3차원 해석에서는 계산영역을 정육면체 격자로 구성해야하며, 복잡한 형상의 물체를 포함시켜 해석하는 경우, 그 물체의 외형을 구성된 정육면체 격자선을 따라 계단형태로 표현해야하는 단점을 가지고 있다.

물체의 표면 격자점에서 확률적 분포함수 값을 계산영역의 격자점에 정의된 함수값으로부터 보간한 값을 이용하여 물체의 표면에서 Bounce-

Back조건을 구현하는 곡면경계처리법⁽³⁻⁵⁾으로 단점을 보완하고 있다. 하지만 이 곡면경계처리법을 이동 물체에 적용하는 경우 이동 중인 물체에 가려진 격자점(Dead Nodes)이 유동장의 격자점으로 전환될 때 이 격자점에서 대한 처리를 단순한 보간법에 의존하고 있어 안정적인 해석을 위해서는 물체의 이동 속도를 극히 제한해야하는 또 다른 단점을 가지고 있다.

단순한 해석과정과 고속화 등 격자불쓰만법의 장점을 그대로 유지하면서 곡면경계처리법의 단점을 보완하고 고정 또는 이동하는 물체에 대한 유동해석을 수행할 수 있는 방법으로 가상경계법이 개발되었다.

가상경계법은 계산영역에 구성된 격자와 독립적으로 물체의 형상을 표현하고 또 물체를 자유롭게 이동시킬 수 있으며 단순한 해석과정과 병렬처리의 용이성 등의 격자불쓰만법의 장점을 그대로 유지하면서 기존의 단점을 가장 효과적으로 보완해줄 수 있는 방법으로 평가되고 있다. 한편 이 해석법의 정밀도와 타당성은 Kim^(6,7)의 가상경계 불쓰만법을 이용한 이동하는 익의 2차원 유동 특성 해석에 관한 연구를 통해서 검증되었다.

이 연구는 최근에 개발된 격자불쓰만법에 가상경계법을 적용하여 회전체의 실제 회전에 의한 유동을 해석하고 회전체의 특성을 분석하는 방법에 관한 것으로 특히 STL형식의 표면격자로 표현된 회전체를 직접 해석코드에서 인식하게 하고 표면격자를 조밀화하여 해석 안정성을 확보하고 기존 해석법의 격자생성 과정을 효과적으로 보완하였다.

2. 본 론

2.1 격자불쓰만법

격자불쓰만법은 입자의 운동에너지의 변화를 나타낸 불쓰만방정식을 이용하여 물리적인 현상을 수치적으로 해석하는 방법으로 불쓰만방정식의 충돌항에 BGK⁽⁸⁾완화법을 적용하여 시간에 대한 1차항만을 포함시킨 입자밀도분포의 확률적 확산식인 격자불쓰만방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{c} \cdot \nabla f = -\frac{1}{\tau_t}(f - f^{(eq)}) \quad (1)$$

여기서 τ_t 는 완화시간이며, $f^{(eq)}$ 는 평형상태의

분포함수이다. 식 (1)을 α 개의 방향을 갖는 격자 모델로 이산화한 식이 식 (2)이다.(Chen⁽⁹⁾, He⁽¹⁰⁾)

$$f_\alpha(\vec{x} + \Delta\vec{x}, t + \Delta t) - f_\alpha(\vec{x}, t) = -\frac{\Delta t}{\tau_t} (f_\alpha(\vec{x}, t) - f_\alpha^{(eq)}(\vec{x}, t)) \quad (2)$$

식 (2)에서 \vec{c}_α 는 α 방향의 이산속도, f_α 는 α 방향의 분포함수 그리고 $\Delta\vec{x} (= \vec{c}_\alpha \Delta t)$ 는 이웃한 격자점 간의 거리이다. 19개의 방향을 갖는 D3Q19 3차원 격자모델에서 평형상태 입자분포함수 ($f^{(eq)}$)는 Maxwell-Boltzmann 분포함수를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f_\alpha^{(eq)} = \rho w_\alpha \left(1 + \frac{c_{\alpha a} u_a}{C_s^2} + \frac{Q_{\alpha ab} u_a u_b}{2C_s^4} \right) \quad (3)$$

$$Q_{\alpha ab} = c_{\alpha a} c_{\alpha b} - C_s^2 \delta_{ab} \quad (4)$$

$$w_\alpha = \begin{cases} \frac{1}{3} & \alpha = 0 \\ \frac{1}{18} & \alpha = 1, 2, \dots, 6 \\ \frac{1}{36} & \alpha = 7, 8, \dots, 18 \end{cases} \quad (5)$$

ν_t 는 유효점성계수로 점성계수(ν)와 에디점성계수(ν_e)의 합이며, SGS(Sub Grid Scale)모델⁽¹¹⁾에서 에디점성계수와 변형률텐서 S_{ij} 와의 관계는 식 (6), (7)과 같으며

$$\nu_e = (C_{sgs} \Delta)^2 \bar{S}, \quad \bar{S} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (6)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

유효점성계수와 충돌완화시간, τ_t 와 관계는 다음과 같다.

$$\nu_t = C_s^2 (\tau_t - 1/2) \Delta t \quad (8)$$

식 (8)에서 $C_s = c/\sqrt{3}$ 는 격자유체 내에서의 음속을 의미한다. 기체의 상태방정식으로부터 유도한 압력은 $p = \rho C_s^2$ 이며, 이산 속도장에서 유체의 밀도와 운동량은 식 (9), (10)과 같이 격자점에서 입자 밀도분포함수값을 가지고 계산할 수 있다.

$$\rho = \sum_{\alpha=0}^{18} f_\alpha \quad (9)$$

$$\vec{\rho}u = \sum_{\alpha=0}^{18} c_\alpha f_\alpha \quad (10)$$

2.2 가상경계 볼츠만법

가상경계법은 격자볼츠만 방정식에 외력항을 추가하여 유동장에 위치한 물체의 형상과 이동을 구현하는 것이다. 이 방법은 유동장을 구성한 격자의 변형이나 재생성 없이 물체의 형상을 표현할 수 있을 뿐만 아니라 물체의 이동속도에도 거의 제한이 없이 적용할 수 있다. 이 연구에서는 격자볼츠만방정식에 Buick와 Greated⁽¹²⁾가 제안한 $3/2\omega_\alpha \vec{g} \cdot \vec{c}_\alpha$ 를 추가하는 방법을 이용하였으며 여기서 \vec{g} 는 가상경계와 유동장 사이의 관계를 나타내는 것으로 식 (11)과 같다.

$$g(\vec{x}, t) = \int_{\Omega} G(\vec{X}, t) \delta(\vec{x} - \vec{X}) dV \quad (11)$$

여기서 $G(\vec{X}, t)$ 는 라그랑지 관점의 외력밀도이고 $\delta(\vec{x} - \vec{X})$ 는 델타함수이다. 가상경계법으로 프로펠러의 회전을 모사하기 위한 격자볼츠만법의 외력 $\vec{g}(\vec{x}_e, t)$ 는 다음과 같다.

$$\vec{g}(\vec{x}_e, t) = \sum_l^{N_l} \vec{G}(\vec{X}_l, t) D(\vec{x}_e - \vec{X}_l) \Delta A_l \quad (12)$$

$$D(\vec{x}_e - \vec{X}_l) = \frac{1}{h^3} \delta_h \left(\frac{x_e - X_l}{h} \right) \delta_h \left(\frac{y_e - Y_l}{h} \right) \delta_h \left(\frac{z_e - Z_l}{h} \right) \quad (13)$$

$$\delta_h(r) = \begin{cases} \frac{1}{8} (3 - 2|r| + \sqrt{1 + 4|r| - 4r^2}) & |r| \leq 1 \\ \frac{1}{8} (5 - 2|r| - \sqrt{-7 + 12|r| - 4r^2}) & 1 \leq |r| \leq 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

여기서 h 는 격자간격이며, N_l 은 프로펠러의 표면에 구성된 표면격자점의 수이다. 프로펠러 표면의 라그랑지 격자점 $\vec{X}_l(t)$ 에서 체적력 $\vec{G}(\vec{X}_l, t)$ 와 이동속도 $\vec{U}(\vec{X}_l)$ 그리고 유동속도 $\vec{u}(\vec{X}_l)$ 와의 관계는 식 (15), (16)과 같다.

$$\vec{G}(\vec{X}_l, t) = K_g \left(\frac{\vec{U}(\vec{X}_l) - \vec{u}(\vec{X}_l)}{\Delta t} \right) \quad (15)$$

$$\vec{u}(\vec{X}_l) = \sum_e^{N_e} \vec{u}(\vec{x}_e, t) D(\vec{x}_e - \vec{X}_l) (\Delta x)^d \quad (16)$$

여기서 N_e 는 계산영역에 구성된 오일러리안 격자점의 수이다. 이 연구에서 적용한 가상경계

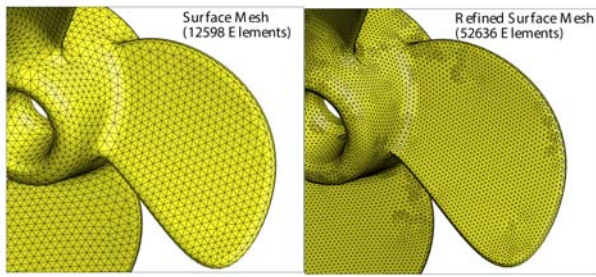


Fig. 1 Surface meshes of STL type of propeller before and after refinement processing

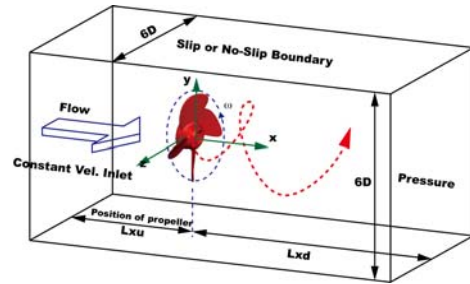


Fig. 2 Calculation domain and applied boundary conditions

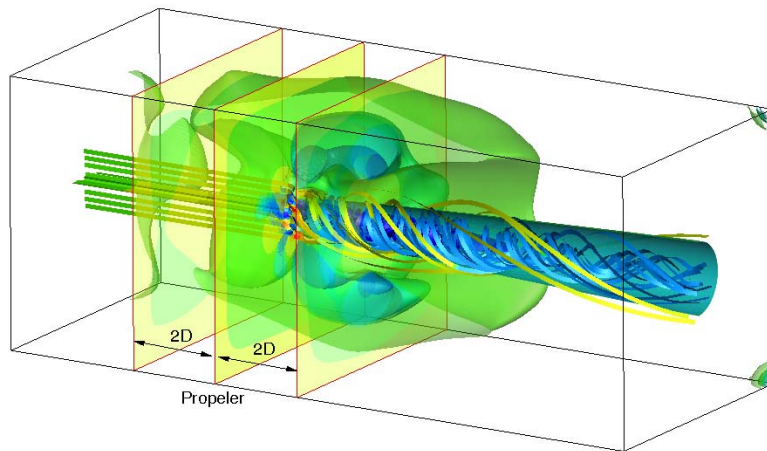


Fig. 3 Streamlines and iso-velocity plot by rotating propeller at $Re = 500, J = 0.5$

볼츠만법은 프로펠러 표면격자점의 이동속도와 오일러린안 격자점에서 유동속도의 차이에 의한 체적력을 격자볼츠만방정식의 외력항으로 적용하여 프로펠러의 회전에 의한 가상경계를 만들어 해석하는 것이다.

3. 결과

3.1 해석

가상경계법을 적용한 격자볼츠만법을 이용하여 프로펠러의 추력 및 공력특성을 해석하기 위한 전처리 과정은 먼저 (1) 해석하고자 하는 프로펠러를 삼각형 모양의 표면격자로 만든 STL형식의 파일을 만들고 (2) 실제로 회전하는 프로펠러에 의한 유동을 모사하기 위해 충분한 수의 정육면체 격자를 계산영역에 구성한다. (3) STL형식의 프로펠러 파일을 계산영역의 한 지점에 고정시키고 (4)안정적인 해석을 수행하기 위하여 프로펠러의 외형에 형성된 표면격자의 최대 크기와 계산영역의 격자 크기의 비가 3이하가 되도록 표면격자를 조밀화하는 것이다. 이 연구에서 적용한 4

개의 익을 가지고 있는 프로펠러의 표면격자의 조밀화 작업 전, 후의 격자형상은 Fig. 1과 같다.

격자볼츠만 해석은 완화시간, 계산영역의 경계조건 등을 포함한 모든 조건을 설정한 후 매 시간스텝마다 충돌(Collide)과 확산(Streaming) 과정을 반복적으로 수행하는 것이다. 프로펠러의 회전에 의한 유동현상을 모사하기 위한 가상경계법은 격자볼츠만해석의 충돌과 확산과정을 마치고 다음 시간스텝으로 넘어가기 전에 프로펠러의 표면격자점에서 프로펠러의 회전에 의한 이동속도(\vec{U})와 유동속도(\vec{u})로부터 체적력 $\vec{G}(\vec{X}_p, t)$ 을 계산하고 이를 계산영역의 각 격자점으로 분산시켜 이를 격자볼츠만 방정식의 외력항으로 적용하는 것으로 한 시간스텝의 가상격자볼츠만 해석과정을 완료한다.

해석에 이용한 계산영역의 크기와 경계조건은 Fig. 2에서 보는 바와 같으며 프로펠러의 크기와 회전속도를 기준으로 하는 레이놀즈수($Re = rwD/\nu$)를 100, 500, 1000으로 고정시켰고 계산영역에 구성한 기준 길이당 격자수(n_{res})는 20~48 사이의

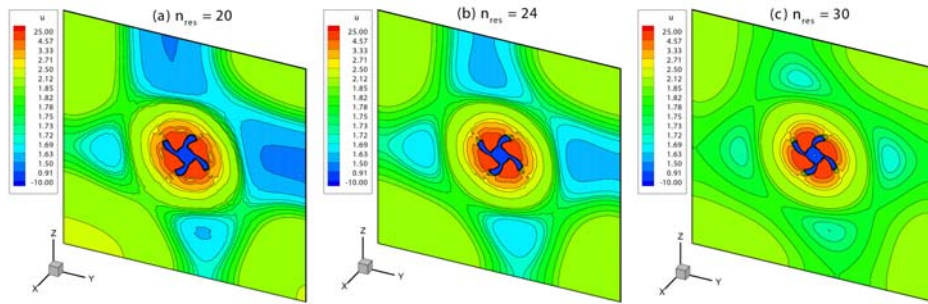


Fig. 4 Comparison of the flow direction velocity distributions with different grid resolutions $n_{res} = 20, 24, 30$ at $Re = 500$ and $J = 0.1$

값을 적용하여 해석을 수행하였다. 프로펠러는 레이놀즈수가 100일 때 계산영역의 중심에 위치시켰으나 레이놀즈수가 500과 1000일 때는 해석 안정성을 확보하기 위하여 프로펠러의 위치를 상류 쪽으로 이동시켜 후류 계산영역을 확장시켰다. 프로펠러의 추력특성은 전진비($J = U_0/nD$)의 변화에 따른 추력효율($\eta = JC_T/C_P$)로 나타냈고 여기서 C_T 와 C_P 는 프로펠러의 추력계수와 동력계수이다.

3.2 해석결과

(1) 유동현상

프로펠러의 회전에 의한 전체적인 유동현상을 확인하기 위하여 레이놀즈수를 500, $n_{res} = 30$, 전진비가 0.5일 때 계산영역의 둘레 경계에 미끄럼조건을 적용하여 해석한 결과를 3차원 유선과 등속도면으로 Fig. 3에 나타냈다.

입구에서 유입된 유체는 프로펠러를 통과한 후 강하게 회전하며 후류로 흘러가는 것을 볼 수 있으며, 회전하고 있는 프로펠러의 익 주변에서는 유체가 강하게 회전하지는 않지만 회전익에 의해 가속되어 후류로 흘러가는 등 익의 회전에 의한 유동을 정확하게 보여주고 있다.

(2) 격자수와 해석결과

계산영역에 구성된 격자수는 해석정밀도와 안정성 및 해석시간과 밀접한 관계를 가지고 있어 최적의 격자수를 적용하는 것은 효율적인 해석을 수행하는데 필수적인 요소이다. 프로펠러의 지름을 기준으로 구성된 격자수 n_{res} 가 20, 24, 30일 때 프로펠러가 위치한 단면에서 유동방향의 속도

분포를 비교한 것이 Fig. 4이다. 전진비가 0.1일 때 계산영역의 입구에서는 유속이 2.0이며 프로펠러의 회전 영역에서 유동방향의 유속은 25 정도를 갖는 것으로 나타났다.

프로펠러 회전 영역의 주변에서는 n_{res} 가 20과 24일 때 전반적으로 1.0 ~ 2.0 정도의 속도를 가지며 프로펠러를 중심으로 상하좌우 영역에 속도가 비대칭적으로 분포하는 것을 볼 수 있다. 반면에 $n_{res} = 30$ 일 때는 전반적으로는 2.0 정도의 속도를 가지며 다소 낮은 속도를 갖는 영역이 상하좌우에 대칭적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 프로펠러와 근접한 영역에서 등속도선이 상대적으로 정밀하게 나타나는 것도 확인할 수 있다.

(3) 유동분석

전진비의 차이에 따라 유동장의 단면에서 유동특성을 비교하기 위해 프로펠러가 위치한 단면과 2D 떨어진 상, 하류 단면에서 압력과 속도분포를 나타낸 그림이 Fig. 5이다.

프로펠러가 위치한 단면 (Fig. 5(b))에서 압력과 속도가 프로펠러의 회전에 인하여 고, 저압과 고, 저속 분포가 주기적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 전진비가 0.5일 때 입구경계에서 유속은 10이므로 계산영역의 미끄럼조건을 적용한 경계면 주변에서도 약 10 정도의 속도 분포를 가진다. (Fig 5(a)) 반면에 프로펠러가 위치한 단면에서는 회전하는 익의 영향으로 유동방향 속도의 고속과 저속 영역이 주기적으로 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.

하류 (Fig 5(c))에서는 프로펠러를 통과한 유체가 가속되어 흘러가고 있음을 예측할 수 있지만 프로펠러의 중심에서는 국부적으로 역방향의 속

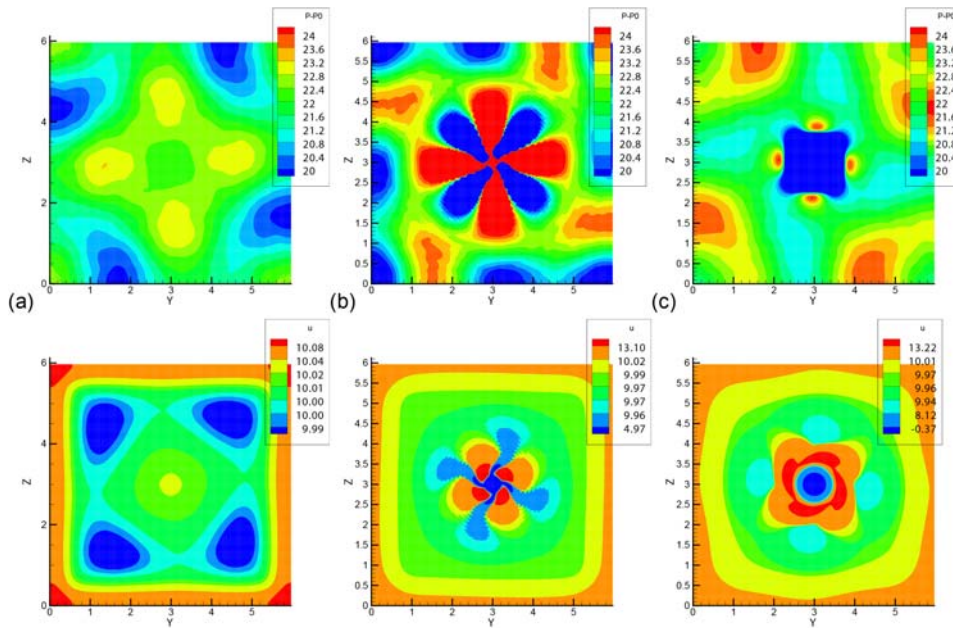


Fig. 5 Contour plots of the pressure and flow direction velocity on the cross sections at $x = -2D, 0, 2D$ ($Re = 500, J = 0.5$)

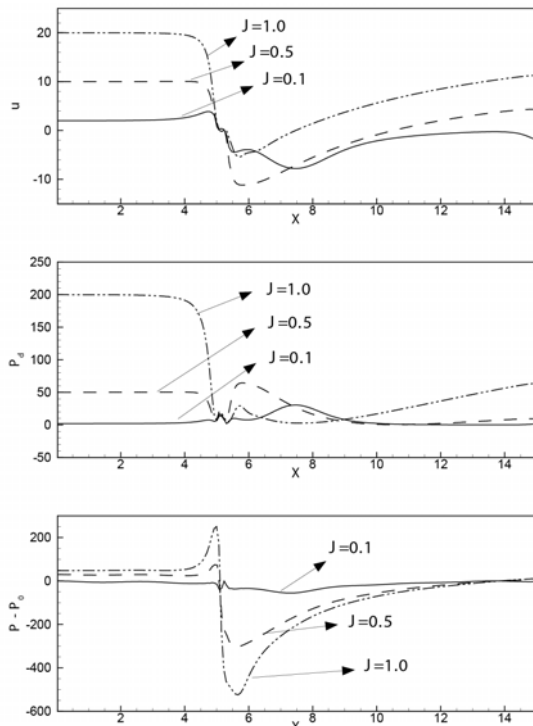


Fig. 6 Variations of the flow direction velocity, dynamics pressure and pressure along the center line at $Re=500$ and $J=0.1, 0.5, 1.0$

도를 갖는 것도 볼 수 있다. 이는 장애물에 의해 차단된 유동장의 후류에서 나타나는 현상과 동일한 현상으로 판단된다.

레이놀즈수가 500일 때 프로펠러의 중심을 지나 는 중심선에서 전진비의 변화에 따른 압력과 속도의 변화는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 유동방 향의 속도와 동압의 경우 입구경계에 설정된 속도를 유지하면서 프로펠러를 향해 흘러가고, 프 로펠러에 근접하면서 속도는 급격히 감소한다. 그리고 프로펠러를 통과한 후 속도가 점진적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

(4) 풍동실험의 모사해석

프로펠러의 풍동실험과 유사한 조건으로 모사 하기 위해서 계산영역의 둘레경계에 점착조건을 설정하고 그 외 다른 조건은 앞에서 설명한 조건 과 동일하게 설정하여 해석을 수행하였다.

$Re = 100, J = 0.3$ 과 $Re = 1000, J = 0.5$ 일 때 프 로펠러가 위치한 곳과 1D 떨어진 상, 하류 단면에서 압력분포를 Fig. 7에 나타냈다. $Re=100$ 일 때 $n_{res} = 24$ 를 적용하였으며 $Re=1000$ 일 때는 후류 에서 해석을 안정시키기 위하여 격자를 $n_{res} = 48$ 로 하여 2배 조밀하게 구성하였다.

낮은 레이놀즈수를 갖는 유동의 경우 프로펠러 가 위치한 곳과 상류(Fig. 7(a), (d))에서는 프로펠 러의 회전의 영향을 직접 받아 고압과 저압이 뚜 렷하게 주기적으로 나타나는 것을 볼 수 있다.

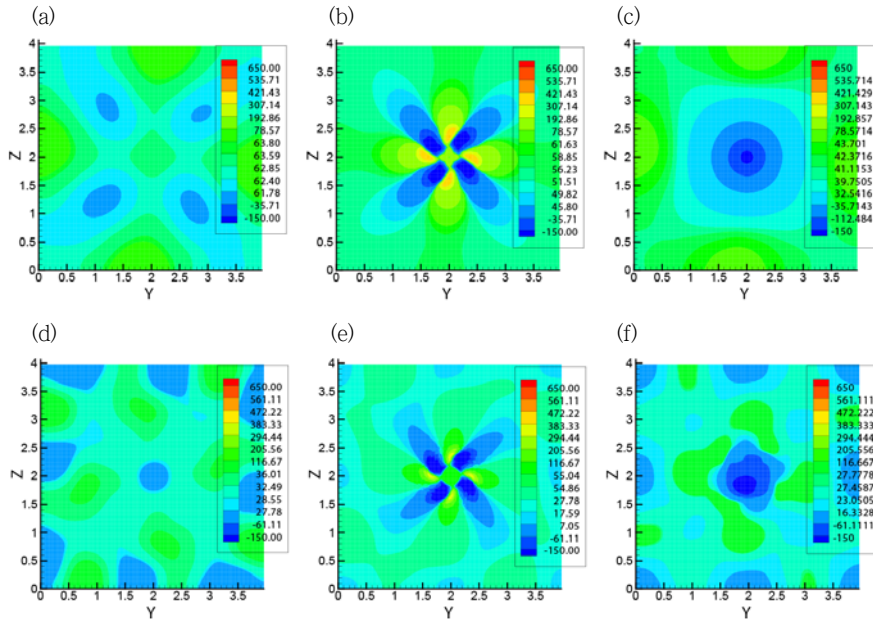


Fig. 7 Contour plots of the pressure on the cross sections at $x = -1D(a,d), 0(b,e), 1D(c,f)$
 ((a), (b), (c) : $Re = 100$, (d), (e), (f) : $Re = 1000$)

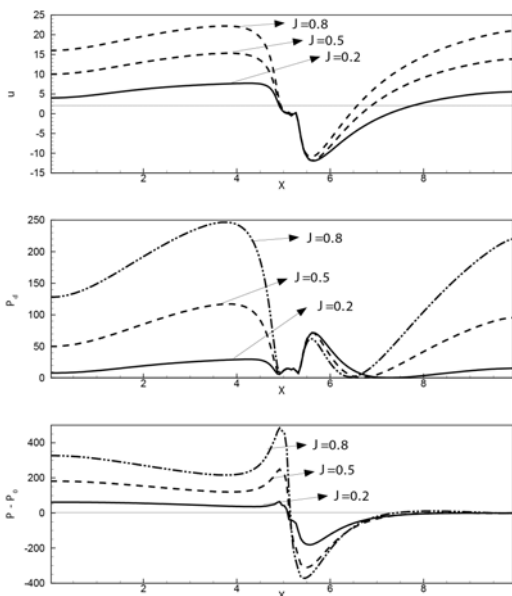


Fig. 8 Variations of the flow direction velocity, dynamics pressure and pressure along the center line at $Re = 100$ for no-slip wall boundary condition

하지만 레이놀즈수가 낮을 때 후류에서는(Fig. 7(c)) 프로펠러 회전의 영향이 사라지고 동심원 형태의 압력분포를 갖는 것을 볼 수 있다.

상대적으로 레이놀즈수가 높을 때는 후류에서도 프로펠러의 회전의 영향을 받아 압력의 주기적인 분포가 유지되고 있는 것을 볼 수 있다

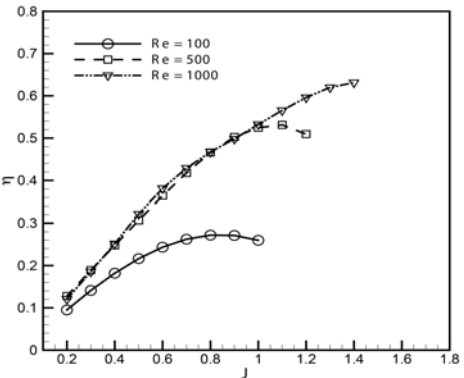


Fig. 9 Efficiency of the propeller as variation of the advanced ratio at $Re = 100, 500, 1000$

(Fig. 7(f)).

상류에서 하류까지 프로펠러의 중심선을 따라 압력과 속도의 변화를 Fig. 8에 나타냈다. 계산영역의 둘레 경계면에 미끄럼조건을 적용한 결과인 Fig. 6에서는 입구의 유속이 프로펠러에 근접할 때까지 유지되다가 급격히 감소하지만 Fig. 8은 둘레 경계면에 적용한 점착조건과 프로펠러의 회전의 영향으로 유속은 점진적으로 증가하다가 프로펠러를 통과하면서 급감한 후 출구를 향해 흘러가면서 입구에서 설정한 속도까지 회복되는 것을 볼 수 있다.

레이놀즈수와 전진비의 변화에 따른 프로펠러의 추력효율을 Fig. 9에 나타냈다. 추력효율은 전

진비가 증가할수록 증가하다가 최대 효율에 이른 후 점진적으로 감소하는 전형적인 프로펠러의 추력효율 특성을 갖는 것으로 해석되었다.

4. 결 론

프로펠러의 공력 및 추력 특성을 수치적으로 해석하는데 기존의 해석방법에 비해 격자생성에 소요되는 시간을 최소화하고 상대적으로 높은 해석정밀도를 유지할 수 있는 방법으로 가상경계법을 적용한 격자볼츠만법을 제안한다. 가상경계볼츠만법은 프로펠러의 회전속도와 유동속도의 차로 인한 힘을 계산하고 이를 계산영역의 격자점에 분산시켜 격자볼츠만방정식의 외력항으로 적용하여 해석하는 방법이다. 이 연구에서는 STL형식의 표면격자로 구성된 프로펠러를 직접 해석코드에서 인식할 수 있도록 하여 격자생성과정을 최소화할 수 있었으며 표면격자와 해석영역에 구성된 격자크기의 차이로 인한 해석 불안정성은 프로펠러의 표면에 구성된 가장 큰 격자의 크기를 계산영역에 구성한 격자 크기의 3배 이하가 되도록 조밀화하여 안정적인 해석을 수행할 수 있었다.

이 연구에서 제안한 방법의 해석 결과로부터 4개의 익을 가지고 있는 프로펠러의 추력효율을 도출하여 이 효율이 전진비가 증가함에 따라 증가하다가 최고효율에 이른 후 감소하는 전형적인 특성과 일치하는 것을 확인하였다. 다만 회전속도를 기준으로 하는 레이놀즈수와 전진비가 커질수록 후류에서 유동이 더 복잡해져 해석이 급격하게 불안해지는 경향이 나타났다. 격자수 n_{res} 를 30이상으로 증가시키고 후류의 계산영역을 길게 확장시켜 해석안정성을 확보할 수 있었지만 최적의 n_{res} 조건뿐만 아니라 기존의 해석법과 난류모델에 따른 최적의 해석조건을 도출하기 위한 후속연구를 계획하고 있다.

후 기

본 연구는 2015학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제)지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌 (References)

- (1) "Ansys Fluent Theory Guide," Ansys, Inc, USA
- (2) Wang, Y., Brasseur, J. G. and Banco, G. G., 2010,

"Computational Modeling in Biomechanics," Springer Science Business, U.S.A.

- (3) Kim, H. M., Myung S Jhon, 2007, "Numerical Study on Flow Over Oscillating Circular Cylinder Using Curved Moving Boundary Treatment," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 31, No. 11, pp. 895~903.
- (4) Kim, H. M., 2008, "Numerical Study on Flow Moving Circular Cylinder Near the Wall Using Immersed Boundary Lattice Boltzmann Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 32, No. 12, pp. 924~930.
- (5) Kim, H. M., 2009, "Numerical Study on Aerodynamic Characteristics of the Moving Circular Cylinder Near the Wavy Wall," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 33, No. 2, pp. 107~115.
- (6) Kim, H. M., 2010, "Numerical Study on Turbulent Flow over Cylinder Using Immersed Boundary Lattice Boltzmann Method with Multi Relaxation Time," *Korean Society of Computational Fluid Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 21~27.
- (7) Kim, H. M., 2011, "Numerical Analysis of the Airfoil in Self-propelled Fish Motion Using Immersed Boundary Lattice Boltzmann Method," *Korean society of computational fluid engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 24~29.
- (8) Bhatnagar P. L., Gross, E. P. and Krook, M., 1954, "A Model for Collision Processes in Gases. I: Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-component System," *Phys. Rev.* Vol. 94, pp. 511~525.
- (9) Chen, H., 1993, "Discrete Boltzmann Systems and Fluid Flow," *Comp. Phys.*, Vol. 7, pp. 632~637.
- (10) He X., Zou Q., Luo L.-S. and Dembo, M., 1997, "Analytic Solutions of Simple Flow and Analysis of Non-slip Boundary Conditions for the Lattice Boltzmann BGK Model," *J. Stat. Phys.*, Vol. 87, pp. 115~136.
- (11) Succi, S., 2001, "Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond," Oxford University Press, USA.
- (12) Buick, J. M. and Grated, C. A., 2000, "Gravity in a Lattice Boltzmann Model," *Physical Review E*, Vol. 61, No. 5, pp. 5307~5320.