

가상경계볼츠만법을 이용한 자력추진 물고기 운동 익의 유영해석

김형민¹

NUMERICAL ANALYSIS OF THE AIRFOIL IN SELF-PROPELLED FISH MOTION USING IMMERSED BOUNDARY LATTICE BOLTZMANN METHOD

Hyung Min Kim¹

Immersed boundary lattice Boltzmann method has been applied to analyze the characteristics of the self-propelled fish motion swimming robot. The airfoil NACA0012 with caudal fin stroke model was considered to examine the characteristics. The foil in steady forward motion and a combination of steady-state harmonic deformation produces thrust through the formation of a flow downstream from the trailing edge. The harmonic motion of the foil causes unsteady shedding of vorticity from the trailing edge, while forming the vortices at the leading edge as well. The resultant thrust is developed by the pressure difference formed on the upper and lower surface of the airfoil, and the time averaged thrust coefficient increases as Re increase in the region of $Re \leq 700$. The suggested numerical method is suitable to develop the fish-motion model to control the swimming robot, however It would need to extend in 3D analysis to examine the higher Re and to determine the more detail mechanism of thrust production.

Key Words : 가상격자볼츠만법 (Immersed Boundary Lattice Boltzmann Method), 난류유동 (Turbulent Flow), SGS모델 (Sub Grid Scale Model), 자력추진 물고기운동 (Self-Propelled Fish Motion)

1. 서 론

세계 과학 선진국들은 최근 초소형 로봇 개발에 열을 올리며서 체내에 투입돼 각종 질병을 치료할 수 있는 이른바 자력추진 유영로봇이 출현될 것으로 기대하고 있다. 이를 실현시킬 수 있는 것은 뇌와 신경에 해당하는 논리회로, 시각 또는 청각 등을 담당할 각종 센서, 팔과 다리 역할을 할 기계장치, 그리고 이들을 유기적으로 움직이게 할 수 있는 구동기까지 완벽하게 갖춘 통합 시스템을 육안으로는 보이지 않을 정도로 작게 제작하는 기술인 MEMS (Micro Electro-Mechanical System)의 도움을 받아 곧 현실화 될 것으로 기대

접수일: 2011년 3월 31일, 수정일: 2011년 4월 28일,
게재확정일: 2011년 4월 29일.

¹ 정회원, 경기대학교 기계시스템공학과

E-mail: pius@kyonggi.ac.kr

되며 최근 이 분야에 급속한 기술 진보 속도를 가늠하게 하는 개발 성과들이 세계 곳곳에서 잇따라 발표되고 있다. 특히 좁은 관을 유영하여 이동할 수 있는 마이크로 유영로봇은 의학적으로는 혈관 질병의 검사 및 치료, 환경감시용 이동 검출 센서 그리고 원전 또는 우주선의 표면 있는 관과 같이 직접적인 접근이 어려운 수 백 마이크로 이하의 직경의 관의 검사 및 수리를 포함한 다양한 응용분야를 가지고 있어 개발이 시급하다[1].

유영로봇 개발과 관련된 중요한 기술적 난제들이 해결의 실마리를 보이면서 향후 수 십 년 내에 장기 곳곳을 치료하는데 마이크로/나노 로봇이 보편적으로 활용될 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다. 유영로봇 개발은 무엇보다 자력 추진 방법에 대한 연구가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며 현재 여러 가지 추진 방법 중에서 주로 생체운동을 모방한 Flapping 운동과 미생물의 편모운동이 적용되고 있다. 하지만 아직 유동 조건에 따라 이동할 수 있는 추진방법이나 유영 방향을 제어할 수 있는 운동 모델의 개발이 미흡한 상태이다.

이 연구에서는 여러 가지 생체모방 추진방법 중 물고기 추진운동을 모사한 추진 모델을 적용한 익형 유영체의 유동특성을 수치적으로 분석하고 이 추진모델로부터 얻은 추진력을 이용하여 자력 유영을 모사하여 이 자력 유영체의 유영특성을 분석하였다. 이 연구에는 다중물리현상 및 다중계의 해석법으로 최근에 유동해석에 활발하게 이용되고 있는 격자볼츠만법을 적용하였다. 일반적으로 이 방법은 해석영역을 정사각형의 격자를 구성해야 한다는 제한 조건이 있어 이를 극복하기 위하여 구성격자와 독립적으로 물체의 이동과 변형을 모사할 수 있는 가상경계법을 접목시킨 이 수치해석법은 이전에 수행된 연구[2]에서 그 정도를 검증하였다. 계산영역에 구성된 격자와 독립적으로 물체의 변형과 이동을 자유롭게 구현할 수 있는 가상경계격자볼츠만법은 유영체의 추진운동과 유영을 모사할 수 있는 최적의 방법이며 유동환경에 따른 최적의 물고기 추진운동과 유영체의 방향을 제어할 수 있는 추진모델 개발에 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 수치해석방법

2.1 레티스볼츠만법

볼츠만수송방정식(Boltzmann transport equation : BTE)[3~7]의 정확한 해를 구하기 위해서는 수치적으로 막대한 계산량이 요구되지만 충돌항을 Bhatnagar Gross Krook(BGK)[8]완화법으로 이산화한 격자볼츠만법 (Lattice Boltzmann method : LBM)은 그 계산량을 획기적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 다중물리현상과 다중계 해석에 적용이 용이하여 현재 여러 분야에서 적용이 시도되고 있는 해석법이다. BGK 완화법을 적용한 BTE의 이산화 방정식은 식(1)과 같다.

$$f_{\alpha}(\vec{x} + \vec{c}\Delta t, t + \Delta t) - f_{\alpha}(\vec{x}, t) = -\frac{\Delta t}{\tau_i} (f_{\alpha}(\vec{x}, t) - f_{\alpha}^{eq}(\vec{x}, t)) \quad (1)$$

여기서 $f_{\alpha}(\vec{x}, t)$ 는 각 방향의 확률적 입자밀도분포함수이며, $f_{\alpha}^{eq}(\vec{x}, t)$ 는 평형상태의 분포함수이다. 이산속도 (\vec{c}_{α})는 2차원에서 9개의 방향을 갖는 D2Q9 모델[9]을 적용하였으며 이 모델에서 확률적 밀도 분포함수 f 와 유도장의 물리량 밀도, 속도와의 관계는 식(2)와 같다.

$$\rho(\vec{x}, t) = \sum_{\alpha} f_{\alpha}, \quad u(\vec{x}, t) = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha} c_{\omega} f_{\alpha} \quad (2)$$

식(1)에서 유동특성은 완화시간 τ_i 에 의해서 결정되며 이 완화시간과 유효점성계수 ν_i 와 관계는 식 (3)과 같다.

$$\nu_i = C_s^2(\tau_i - \Delta t/2) \quad (3)$$

여기서 $C_s = c/\sqrt{3}$ 으로 격자유체 내에서의 음속이고 유효점성계수(ν_i)는 점성계수(ν)와 에디점성계수(ν_e)의 합이다. SGS (Sub Grid Scale)모델[10]에서 변형유크텐서와 격자의 크기로 결정되는 유효점성계수는 LBM에서 변형유크텐서는 비평형상태의 운동량텐서를 이용하여 계산이 가능하며 이들의 관계로부터 얻은 SGS모델을 적용한 완화시간(τ_i)은 식(4)와 같다.

$$\tau_i = \frac{1}{2} \left(\sqrt{r^2 + \frac{1}{\rho} \left(\frac{C_{sgs}\Delta}{\Delta x} \right)^2 \left(\frac{C_2}{C_4} \right)^2 \sqrt{8\Pi_{ij}\Pi_{ij}} + \tau} \right) \quad (4)$$

$$\Pi_{ij} = \sum_{\alpha=0}^9 c_{\alpha} c_{\alpha} f_{\alpha}^{\neq} \quad (5)$$

2.2 가상경계법

Buick와 Greated[11]가 제안한 가상경계법은 LBE의 오른쪽 항에 체적력, $3/2\omega_{\alpha}g_{\alpha} \cdot \vec{c}_{\alpha}$,를 추가하여 물체의 형상을 모사하는 방법으로, 체적력의 \vec{g}_{α} 는 가상경계와 유동장 사이의 관계를 나타내는 것으로 식 (6)과 같다.

$$g_i(\vec{x}_{mn}, t) = \sum_l G_l(s, t) D_{mn}(\vec{x}_{mn} - \vec{X}_l) \Delta s_l \quad (6)$$

여기서 $\vec{G}(s, t)$ 는 라그랑지관점의 외력밀도이고, \vec{x}_{mn} 은 격자점, \vec{X}_l 은 물체의 외형 경계점을 그리고 Δs_l 은 물체의 외형을 구성하는 경계점들 사이의 간격이다. D_{mn} 은 유동장 내의 구성된 격자계에서 델타함수로 식(7-8)과 같다.

$$D_{mn}(\vec{x}_{mn} - \vec{X}_l) = \frac{1}{h^2} \delta_h \left(\frac{x_{mn} - X_l}{h} \right) \delta_h \left(\frac{y_{mn} - Y_l}{h} \right) \quad (7)$$

$$\delta_h(a) = \begin{cases} \frac{1}{4} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi a}{2}\right) \right) & |a| \leq 2 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

가상경계로 표현된 물체의 외형 및 이 물체의 이동이 유동장에 미치는 영향은 가상의 경계를 이루는 요소점들 사이에 스프링상수를 이용한 복원력에 탄성체의 변형을 고려한 탄성력을 포함시켜 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_i(s,t) = \kappa_1(Z_i(s,t) - X_i(s,t)) + \kappa_2\left(\frac{\partial^2 X_i(s,t)}{\partial s^2}\right) \quad (9)$$

$\vec{Z}(s,t)$ 는 물체의 가상 경계요소점의 목표점을 나타내며, 라그랑지관점의 경계 요소점들의 속도는 식 (10)과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\partial X_i(s,t)}{\partial t} = U_i(s,t) \quad (10)$$

2.3 추진력

유영체의 추진을 위해 대구류 물고기가 직선 이동할 때 꼬리운동[12~14]을 모사한 추진모델을 선택하였으며 이 추진모델을 적용한 유영체 중심선의 추진 운동방정식은 식 (11)과 같다.

$$h(s,t) = h_{\max}a_1(s)a_2(t)\sin[2\pi(s/\lambda - t/T)] \quad (11)$$

$$a_1(s) = \begin{cases} 0, & s \leq 0.2L \\ \left(\frac{s/L - 0.2}{1 - 0.2}\right)^2, & 0.2L < s \leq L \end{cases} \quad (12)$$

$$a_2(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_0} - \frac{1}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi t}{t_0}\right), & 0 \leq t \leq t_0 \\ 1, & t > t_0 \end{cases} \quad (13)$$

여기서 L 은 중심선의 길이, T 는 운동의 주기, λ 는 파장이며 h_{\max} 는 추진운동의 최대 파고이다.

유영체의 이동은 추진운동으로 얻은 추진력(\vec{F}_t)과 유영체의 이동함에 따라 유영체의 작용하는 양 항력의 합(\vec{F}_s)에 의해서 결정되며 이 운동 방정식은 식 (14)와 같다.

$$\frac{d\vec{v}_f}{dt} = \frac{1}{m_f}(\vec{F}_t + \vec{F}_s) \quad (14)$$

3. 익의 유영 해석

3.1 추진해석

물고기 운동에 의한 추진력으로 유영하는 유영체의 유영특성 분석은 안정적인 유영을 지속할 수 있는 추진모델을 개발하기 위한 필수적인 요소이다. 이를 위해서 (300, 200)크기의 유동장의 중심에 상하가 대칭인 NACA0012 익을 고정시키고 이 익의 중심선에 식(11)~(13)의 추진운동을 적용하였다. 식 (11)~(13)을 적용한 NACA0012 익의 추진운동은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 길이가 L 인 익의 선단으로부터 $0.2L$ 지점까지

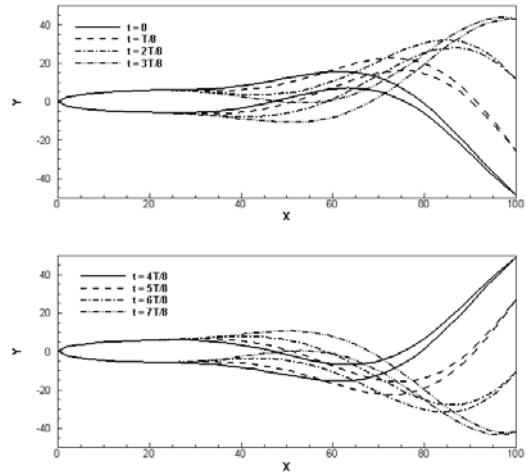


Fig. 1 Slef-propelled fish motion

는 고정되어 있으며 $0.2L$ 부터 후단까지는 주기적인 Flapping 운동을 하는 것을 확인할 수 있다.

이 추진운동의 주기 T 와 꼬리 끝의 최대 파고 h_{\max} 의 비 ($2h_{\max}/T$)를 평균 추진운동 속도(U_{flap})로 정의하고 이 속도를 기준으로 한 레이놀즈수(Re_{flap})를 $U_{flap}L/\nu$ 그리고 자력 추진으로 물고기가 정상상태의 속도, U_p ,에 도달하였을 때 이 속도를 기준으로 한 레이놀즈수(Re_p)를 U_pL/ν 으로 정의할 수 있으며 추력계수(C_T)를 $2F_T/\rho U_{flap}^2 L$ 로 정의하였다. 또한 이 연구에서 식(14)의 물고기의 운동방정식에 물고기의 질량 $m_f = 10$ 으로 고정하였다.

Fig. 2는 레이놀즈수(Re_{flap})가 100인 추진운동에 의해서 익 주위에 형성되는 유선과 압력분포를 시간변화에 따라 나타낸 그림이다. Fig. 2-A는 익의 후단부가 그림의 위쪽 방향으로 움직이는 상태이며, 이 때 익의 후단에서 생성된 와류는 익의 후미로 빠져나가고 있는 것을 볼 수 있고 또한 익의 후단부 상 하면을 중심으로 큰 압력차가 넓게 분포하는 것을 볼 수 있다.

Fig 2에서 $B \rightarrow C$ 로 진행하는 추진운동에서 익의 중앙부위에서 와류가 형성되며 이 와류는 이후에 진행되는 추진운동에 의해서 익의 후미로 이동해 가는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 2-D는 익의 후단부가 그림의 아래 방향으로 운동하기 시작하는 순간으로, 익의 중앙에서 형성된 와류가 익의 후단부에 이동해 와 있다. 이 후 $D \rightarrow E \rightarrow F$ 로 진행하는 동안 와류는 익의 후미 영역으로 빠져나가며 이 때 익의 후단부 상하면을 중심으로 다시 큰 압력차가 넓게 분포하게 되는 것을 확인할 수 있다.

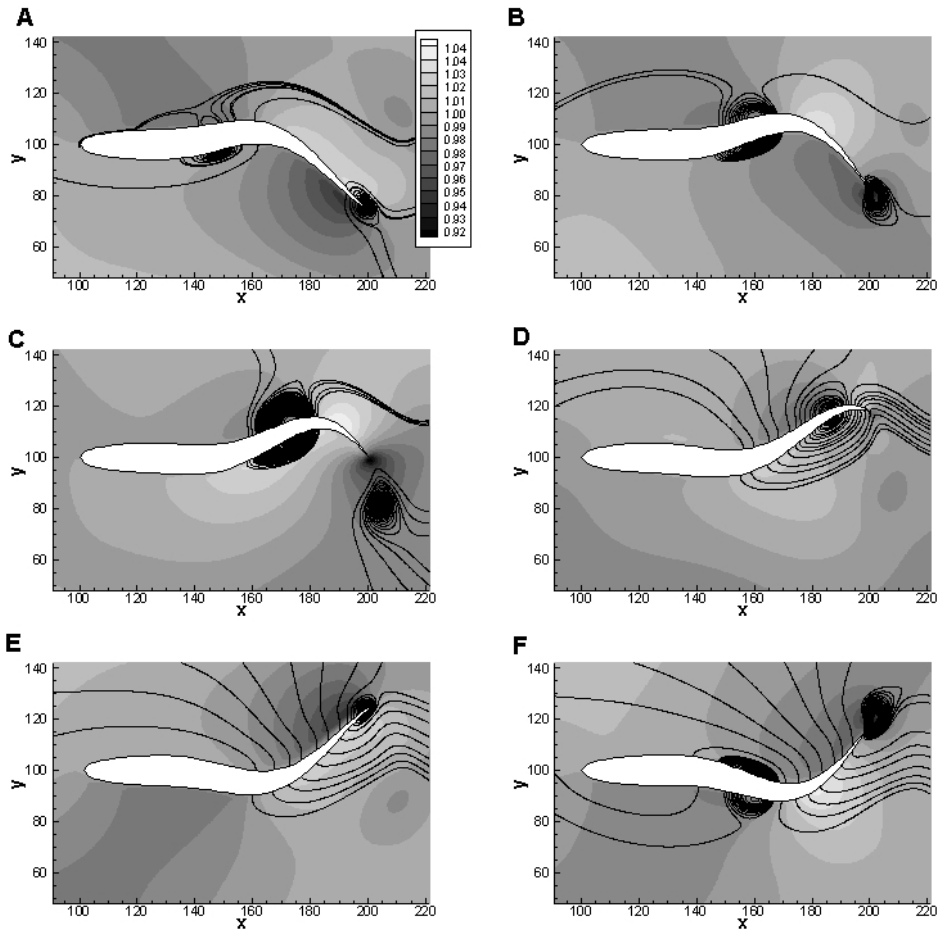


Fig. 2 Pressure distribution and streamlines around the NACA0012 in fish-motion at instant time (A : 0, B: T/8, C: 2T/8, D: 3T/8, E: 4T/8, F: 5T/8)

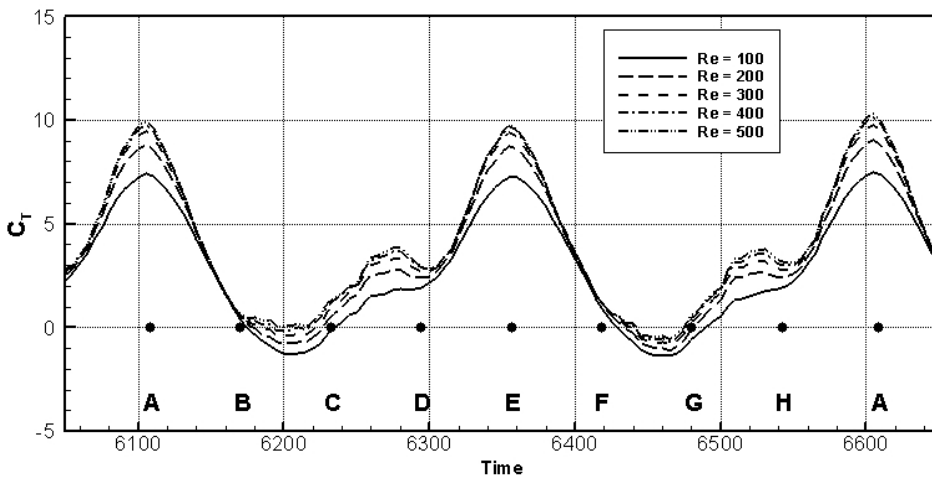


Fig. 3 Thrust coefficient variation in a period of the fish motion

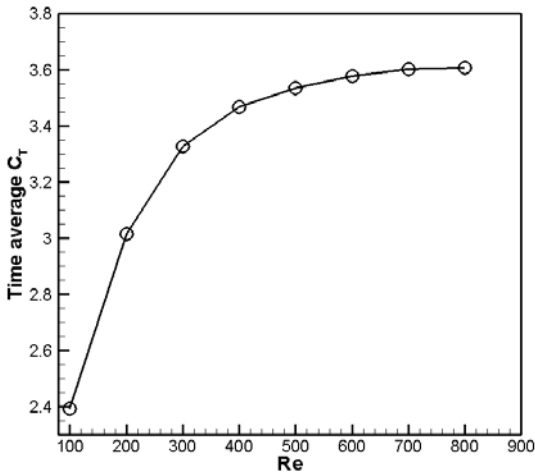


Fig. 4 Time averaged thrust coefficient variation

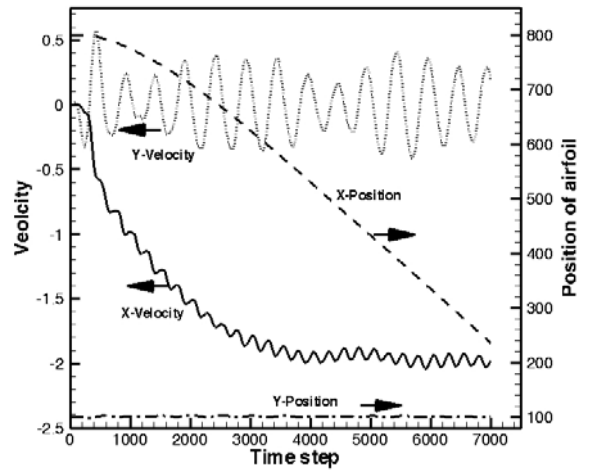


Fig. 6 Airfoil's velocity and positions while swimming

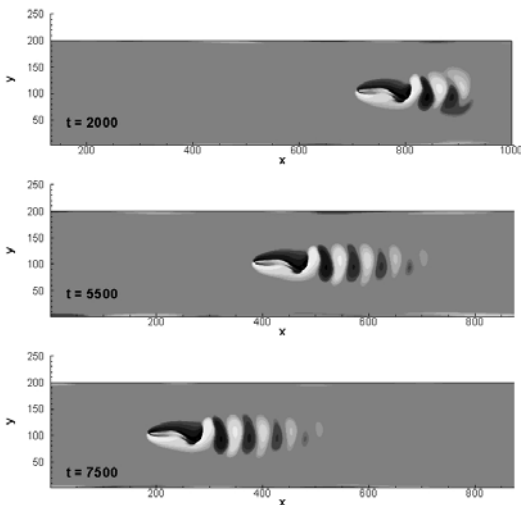


Fig. 5 Vorticity distribution around the foil in swimming

이 추진운동의 한 주기 동안 추력계수의 변화를 시간변화에 따라 나타낸 것이 Fig. 3이다. Fig. 3에 표시한 A~H는 추진운동의 주기를 8등분하여 T/8 스텝씩 증가시킨 시점을 나타내며, Fig. 2의 A-F는 Fig. 3의 문자가 지시하는 시점과 동일한 시점이다. 한 주기 동안 상, 하 방향으로 반복되는 추진운동을 수행하므로 최대 추력은 한 주기 동안 두 번 A와 E시점에서 나타난다. 익의 후단부가 상향에서 하향으로 방향을 전환하는 C와 D시점사이와 또 하향에서 상향으로 방향을 전환하는 G와 H시점사이에서 추력이 일시적으로 증감하는 현상이 있음을 알 수 있다. 또한 추력변화는 레이놀즈수에 관

계없이 동일한 패턴을 갖지만 최대 추력의 크기는 레이놀즈수가 클수록 커지지만 $Re > 700$ 에서는 레이놀즈수가 증가하여도 추력은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 한 주기 동안의 추진운동으로 발생시키는 추력의 크기를 레이놀즈수의 변화에 따라 나타낸 Fig. 4에서 이를 확인 할 수 있다

3.2 유영해석

NACA0012 익에 물고기 추진모델을 적용하여 얻은 추력에 의한 유영해석을 수행하였다. 추진운동에 의한 추력과 익의 유영으로 유체로부터 받는 항력과 양력의 합인 정미 힘(Net force)을 식 (14)에 적용하여 익의 속도 및 위치의 변화를 계산하였다. 이를 가상경계법에 적용하여 익의 이동을 구현하였으며 이 중 Fig. 5는 레이놀즈수가 100인 추진운동에 의해 유영하는 익 주위의 와도분포를 2000, 5500, 7500 시간스텝일 때 나타낸 그림이며 여기서 Flapping으로 추진하는 익에서 나타나는 Reverse Karmann 와열이 형성됨을 확인할 수 있다. 그리고 익이 유영하는 동안 각 방향의 위치와 속도 변화를 나타낸 것이 Fig. 6이다. 시간스텝 2000은 익이 추진운동으로 유영을 시작하는 초기로, 속도가 점진적으로 증가되는 가속운동하는 구간이다. 이 구간에서는 익이 충분한 속도를 얻지 못해서 익의 후미에 상반되는 방향의 와도분포가 쌓여있는 반면에 시간스텝 5500이상에서는 익이 최대속도에 도달한 상태이며, 이 때 익의 후미에 형성된 와도가 상대적으로 길게 분포하는 것을 볼 수 있다.

시간에 따른 익의 속도는 추진운동에 의해 얻지는 추력의 주기적인 변화에 따라 결정되므로 그 속도 역시 같은 주기로 진동하지만 이 진폭은 유영속도에 비해 상대적으로 작다 따

라서 정상상태 ($T > 5000$)에서 익은 X방향으로 속도의 큰 변화 없이 등 속도운동을 하는 것을 볼 수 있다. 반면에 익의 Y방향 이동은 수평적 추진을 얻기 위한 추진 운동에서 부수적으로 나타나는 힘에 의한 것으로, 한 주기의 추진운동에서 상하 방향으로 작용하는 힘이 주기적으로 한 번씩 나타나지만 익은 큰 변화 없이 일정한 Y방향 위치가 유지되는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

익의 추진운동 및 유명과 같이 유동장에 위치한 어떤 물체의 변형과 이동을 모사하기 위해서는 물체의 외형을 따라 구성된 격자와 이 격자의 변형 및 재생성으로 이를 구현할 수 있지만 상대적으로 긴 해석 시간을 요구하는 단점을 가지고 있다. 특히 LBM의 경우는 일반적으로 해석영역을 정사각형의 격자를 구성해야 한다는 제한이 있어 물체의 외형을 계단형태로 표현해야하는 단점을 가지고 있다. 구성격자와 독립적으로 물체의 이동과 변형을 모사할 수 있는 가상경계법은 이 동물체의 근접영역에서의 해석에 정도가 다소 떨어진다는 단점을 가지고 있지만 이 연구에서처럼 익의 변형과 이동을 모사하는 데에는 최적의 방법으로 판단된다.

이 연구에서는 생체운동을 모방한 자력으로 추진되는 유명체의 특성을 분석하기 위해서 NACA0012의 익에 대구류 꼬리 운동 추진 모델을 적용하여 가상경계볼츠만법으로 해석을 수행하였다. 주기적으로 반복되는 추진운동을 하는 동안 익의 중앙에서 형성된 와류는 익의 후단으로 이동하여 후미로 빠져나가는 것을 확인 할 수 있었으며 와류가 익의 후단부에 도달 했을 때 후단부의 상하면을 중심으로 큰 압력차가 분포하며 이 때 익은 가장 큰 추력을 얻는 것으로 나타났다. 시간 평균 추력계수는 레이놀즈수가 증가할수록 커지지만 $Re > 700$ 에서는 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다.

이 연구에서 제안한 방법은 유명체의 유명특성과 방향 제어를 위한 추력운동 모델 개발과 유동조건에 따른 유명체의 유명특성을 효율적으로 분석할 수 있을 것으로 판단되지만 보다 정확한 추력 발생 메커니즘을 확인하기 위해서 3차원해석을 진행할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2010학년도 경기대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- [1] 2006, 장영수, 김광호, "유체 내 생체운동 모방기술", *기계저널*, 제46권, 제4호, pp28~44.
- [2] 2006, 김형민, "다중완화시간 가상경계법을 이용한 실린더 주위의 난류유동해석", *진산유체공학회지*, 제15권, 제2호, pp21~27.
- [3] 1986, Frisch, U., Hasslacher, B. and Pomeau, Y., "Lattice-gas automata for the Navier-Stokes equations," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.56, pp.1505-1508.
- [4] 1988, McNamara, G. and Zanetti, G., "Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas Automata," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.61, pp.2332-2335.
- [5] 1989, Higuera, F. and Jimenez, J., "Boltzmann approach lattice gas simulations," *Europhys. Lett.*, Vol.9, pp.663-668.
- [6] 1990, Qian, Y.H., "Lattice Gas and Lattice Kinetic Theory Apply to Navier-Stokes Equation," *Ph'D Thesis, University et Peirre Marie Curie, Paris.*
- [7] 1991, Koelman, JMVA, "A simple lattice Boltzmann scheme for Navier-Stokes fluid flow," *Europhys. Lett.*, Vol.15, pp.603-607.
- [8] 1954, Bhatnagar, P.L., Gross, E.P. and Krook, M., "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] 1998, Chen, S. and Doolen, G., "Lattice Boltzmann method for fluid flows," *Ann. rev. Fluid Mech.*, Vol.30, pp.329-364.
- [10] 2001, Sauro, S., *Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*, Oxford University Press, USA..
- [11] 2000, Buick, JM and Grated CA., "gravity in a lattice boltzmann model", *Phys. Rev. E*, Vol.61(5), pp5307~5320.
- [12] 2002, Minoru Nagai, *Thinking Fluid Dynamics with Dolphins*, Ohmsha, Ltd, Japan.
- [13] 2008, Yang, Yan, Wu Guan-Hao, Yu Yong-Liang and Tong Bing-Gang, "Two-Dimensional Self-Propelled Fish Motion in Medium: An Integrated Method for Deforming Body Dynamics and Unsteady Fluid Dynamics", *Chin. Phy. Lett.*, Vol.25, No.2, pp597~600.
- [14] 2008, Jorge San Martin, Jean-Francois Scheid, Takeo Takahashi and Marius Tucsnak, "An initial and boundary value problem modeling of fish-like swimming", *arch. Rational Mech. Anal.*, Vol.188, pp429~455.