

셀중심법에 의한 축대칭 극소 로봇의 압축팽창운동에 대한 수치적인 연구

강효길^{†*}, 김문찬^{**}, 전호환^{**}

부산대학교 조선해양공학과 대학원^{*}/부산대학교 조선해양공학과^{**}

A Numerical Simulation based on Cell-centered Scheme for Contractive and Dilative Motion on Axisymmetric Micro-hydro machine

Hyo-Kil Kang^{†*}, Moon-Chan Kim^{**} and Ho-Hwan Chun^{**}

Pusan National University, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering^{*}
Pusan National University, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering^{**}

Abstract

Flow mechanism of contractive and dilative motion is numerically investigated to obtain a propulsive force in highly viscous fluid. An axisymmetric code is developed with unstructured grid system based on cell-centered scheme. It is validated by comparing with the results of Stokes approximation for the problem of uniform flow past a sphere in low Reynolds number($R_n=1$). The validated code is applied to the simulation of contractive and dilative periodic motion of body whose results are quantitatively compared with the two dimensional case. In order to investigate the grid dependency, two different grids are applied to the present computations. The present study provides key information for the development of an axisymmetric Micro-hydro-robot.

※Keywords: Axisymmetric analysis (축대칭 분석), Unstructured grid (비정규 격자), Contractive and dilative motion (압축팽창운동), Cell-centered scheme (셀중심법), Micro-hydro-machine (마이크로 수중로봇, 극소 로봇), Highly viscous fluid (고점성 유체)

1. 서론

수중의 많은 생물체들은 각기 독특한 방식으로

운동을 한다. 대부분의 육상동물들이 수족을 사용하는 것과는 달리 해양생물체들은 지느러미와 자신의 몸을 움직여 전진을 한다. 이는 공기와는 다른 물속이라는 특수한 환경에 적합한 운동인 것이다 (Alexander 1992).

특히, 같은 환경에서도 크기가 작은 해양생물체는 큰 생물체보다 정성을 더 많이 느끼게 된다. 결

접수일: 2003년 9월 10일, 승인일: 2004년 2월 26일

†주저자, E-mail: pstjohn@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2757

과적으로 극소생물에 있어서 물은 매우 점성이 크고 따라서 점성저항이 큰 유체가 되는 것이다. 이와 같이 고정성의 환경에서는 선박이나 로봇과 같은 구조물과 기계는 일반적인 추진기를 사용하여 추진력을 얻기가 곤란하다. 그러나 극소생물과 같이 주기적으로 자신의 몸 전체를 수축, 팽창하는 운동을 한다면 이런 고정성유체하에서도 효과적인 추진이 가능하게 될 것이다(Baba 1974).

최근 컴퓨터의 급속한 발달로 복잡한 유동에 대해서도 해석이 수월해졌으며(김문찬/하동대 2002) 이러한 기술 발전의 도움으로 본 연구에서 제안한 것과 같은 추진 시스템을 해석하기가 보다 용이하게 되었다. 본 연구에서는 복잡한 유동의 해석에 적합한 비정규격자 시스템을 사용하였으며 이는 정규격자에 비해 복잡한 형상에 대해서도 알맞은 격자생성이 가능하다. 그뿐 아니라 각 부분마다 격자 분포의 밀도가 부드럽게(smoothly) 조절될 수 있어 복잡한 형상의 계산에 효과적이다.

또한 본 연구에서는 기존에 사용하던 nodal point 방법 (Kim 1999)에서 보다 정도를 높이고 cell-centered 방법(강효길 등 2003)을 이용하였으며 계산 시 격자의 영향을 확인하여 보다 정확한 해석을 시도하였다.

프로그램은 먼저 축대칭 구(axisymmetric sphere)를 대상으로 하여 검증을 하였다. 계산된 속도와 힘을 엄밀해진 스톡스해와 비교하였다. 그리고 검증된 프로그램을 압축팽창운동을 하는 축대칭 물체에 적용해보았다. 압축팽창운동하는 물체의 표면은 트로코이드(trochoidal)운동으로 구현하였다. 축대칭 계산 결과와 2차원 계산결과를 비교하였다. 이러한 복잡한 운동을 기 연구에서 contractive and dilative 운동(압축팽창운동 또는 수축팽창운동)이라 명명하였다.

본 연구는 혈관이나 늪지와 같은 고정성유체내에서의 추진에 적용할 수 있으리라 생각되며 극소 로봇의 추진시스템개발에 도움이 되리라 생각된다.

2. 수식화 및 이산화

Contractive and Dilative 운동에 대한 이론적 해석을 위하여 비정규 격자를 이용한 셀 중심법

의 유한 체적법을 사용하였다. 인공압축변수 (artificial compressibility parameter)를 사용한 Navier-Stokes 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial a}{\partial r} + P \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial r} + h \right) + Q \left(\frac{\partial f_v}{\partial x} + \frac{\partial g_v}{\partial r} + h_v \right) = 0 \quad (1)$$

여기서,

$$p = \begin{bmatrix} 0 \\ u \\ v_r \end{bmatrix} \quad a = \begin{bmatrix} p \\ u \\ v_r \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} v^2 + p \\ uv_r \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} v \\ uv_r \\ u^2 + p \end{bmatrix}$$

$$f_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_r}{\partial x} \\ \frac{\partial v_r}{\partial x} - \frac{\partial v_r}{\partial x} \end{bmatrix} \quad g_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \\ \frac{4}{3} \frac{\partial v_r}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$h = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} v_r \\ uv_r \\ v_r^2 \end{bmatrix} \quad h_v = \frac{1}{R_n r} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{3} \frac{\partial x}{\partial x} \\ \frac{4}{3} \frac{\partial v_r}{\partial r} - 2 \frac{v_r}{r} \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} \beta^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_n} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_n} \end{bmatrix}$$

여기서 β 는 인공압축변수로서 압력과 속도를 연결하기 위하여 사용된 변수며 식이 수렴할 경우 연속 방정식은 원래의 식으로 복원된다.

식(1)을 Fig. 1에 보인 검사체적에 대하여 유한 체적법의 개념으로 적분하여 이산화하면 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$-S_i \frac{q_i}{dx} = \sum_{j=1}^{n_s} P \left(f_{j+\frac{1}{2}} \Delta y_{j+\frac{1}{2}} - g_{j+\frac{1}{2}} \Delta x_{j+\frac{1}{2}} + h_{j+\frac{1}{2}} \Delta x_{j+\frac{1}{2}} \Delta y_{j+\frac{1}{2}} \right) + \sum_{j=1}^{n_s} Q \left(f_{v,j+\frac{1}{2}} \Delta y_{j+\frac{1}{2}} - g_{v,j+\frac{1}{2}} \Delta x_{j+\frac{1}{2}} \right)$$

$$+ h_{v,j+\frac{1}{2}} \Delta x_{j+\frac{1}{2}} \Delta y_{j+\frac{1}{2}}) \quad (2)$$

여기서, $\Delta x_k = x_{j+1} - x_j$, $\Delta y_k = y_{j+1} - y_j$ 또한 수치적인 발산을 방지하기 위하여 이차 풍상 방법을 사용하였으며 비정상 유동의 해석을 위해서는 Soh(1988)의 방법을 사용하였다.

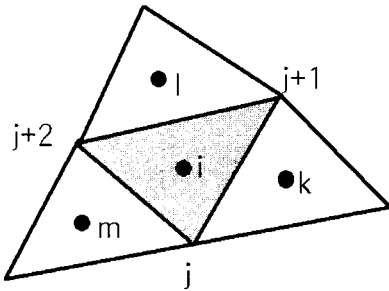


Fig. 1 Control volume for cell-centered scheme

3. 검증

구 주위를 흐르는 유동을 해석하여 개발된 프로그램을 검증하였다. 이때 흐르는 유체는 균일류(uniform flow)이고 레이놀즈수는 1인 고점성유체이다. (3)식은 경계조건으로 사용되는 스톱스의 식이다. 그리고 이 식으로 구해진 analytic 해와 수치 해석된 값을 비교해 프로그램을 검증하였다.

$$u = U \left[e_x - \frac{a}{r} \left(\frac{a^2}{r^2} + 3 \right) e_x + \frac{3}{4} \frac{ax}{r^2} \left(\frac{a^2}{r^2} - 1 \right) e_r \right]$$

$$p = -\frac{3}{2} \mu U \frac{ax}{r^3} \quad (3)$$

위의 식은 구 표면 $r = a$ 일 때 경계조건 $u=0$ 임이 자연스럽게 만족되어진다. 구에 작용하는 힘을 나타내는 저항계수(drag coefficients)는 다음과 같다(Currie 1974).

$$C_D = \frac{24}{R_n}$$

구 표면은 No-slip 조건이 적용되었다. 속도는 입구속도로 무차원화 되었고 길이는 구의 반지름으

로 무차원화 되었다. $x = 0$ 일 때(중앙에서) x 방향 속도인 u 를 Stokes의 해와 비교하였다.

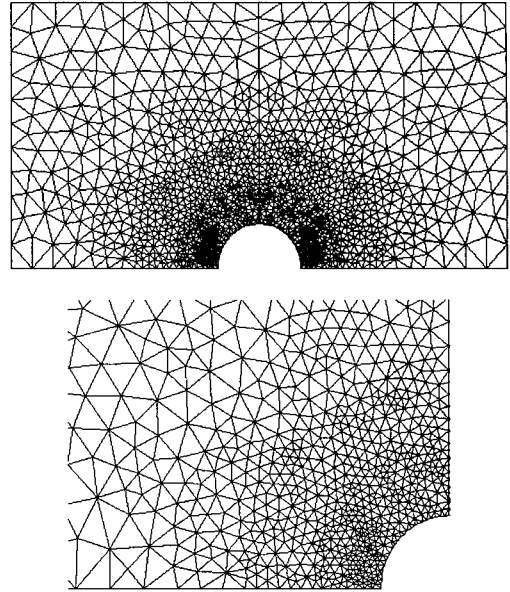


Fig. 2 Generated unstructured grid around the sphere and zoom-up view

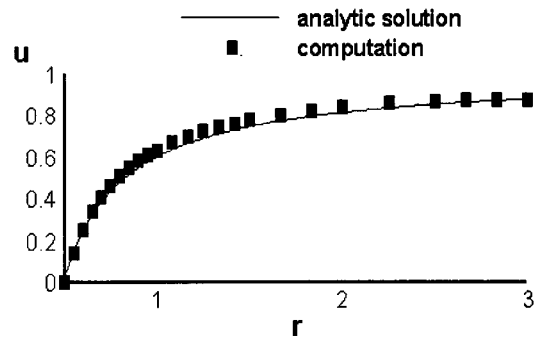


Fig. 3 Comparison of u-velocity at center plane ($x=0$)

C_D 값도 엄밀해와 비교하여 Table 1에 나타내었다. 격자수의 영향을 보기위해 2658개의 격자를 사용한 경우와 더 조밀한 7334개의 격자인 경우에 대해 해석을 하였다. Cell-centered scheme, Nodal point scheme 두 경우 모두 격자가 조밀할

Table 1 Computed x-directional forces acted on the sphere($R_n=1$)

		frictional force	pressure force	total force(C_D)
Stokes solution		16.00	8.00	24.00
Computations	I .7334	16.04	8.00	24.04
	I. 2658	15.14	7.99	23.13
	II. 7334	15.86	8.12	23.98
	II. 2658	14.88	7.80	22.68

※ I. Cell-centered scheme
 II. Nodal points scheme

수록 스톡스해와 더욱 유사해졌으며 Cell-centered scheme의 경우가 stokes해와 더욱 유사한 해를 주었다. 그리고 조밀한 7334개의 경우에는 Nodal point scheme의 값도 Stokes 해에 어느 정도 잘 수렴하나 성결은 격자의 경우 (comparatively coarse grid)에는 Cell-centered scheme에 비해 정도가 더욱 낮은 결과가 나온다. 즉, 셀중심법 (Cell-centered scheme)은 아주 조밀한 격자를 사용할 때뿐만 아니라 성결은 격자를 이용할 경우에 더욱더 Nodal point scheme에 비해 우수성이 잘 나타났다.

4. 축대칭 물체의 수축팽창운동

Contractive and Dilative 운동은 일정주기를 가지고 운동한다는 점에서 sinusoidal 운동을 하는 peristaltic 운동과 유사하다. 그러나 peristaltic 운동은 압력을 이용해 전진을 하고 점성이 저항력으로 작용하는 반면 Contractive and Dilative 운동은 점성을 이용해 추진력을 얻고 압력은 저항이 된다. 그러므로 점성이 높은 곳에서는 Trochoidal 운동을 하는 수축팽창운동이 peristaltic 운동보다 효과적임을 알 수 있다. 이러한 트로코이드 운동의 점성력에 의한 추력 발생 모습을 Fig. 6에 도시하였다.

4.1 Trochoidal 운동

앞서 언급한 바와 같이 점성이 높은 곳에서는

일반 추진기에 의한 추진이 어려워지므로 극소생물체와 같이 점성을 추진력으로 이용하는 수축팽창운동이 더욱 효과적이다.

해석하고자 하는 수축팽창운동은 trochoidal 운동에 의해 구현된다. 표면운동의 식은 (4)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x' &= x + A(x)bcos(kx + wt)/L \\ y' &= y_0 + A(x)sin(kx + wt)/L \end{aligned} \quad (4)$$

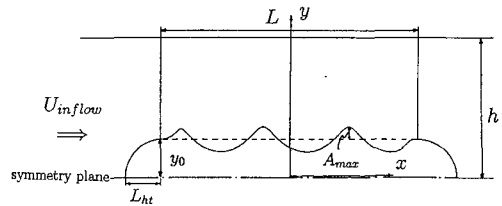


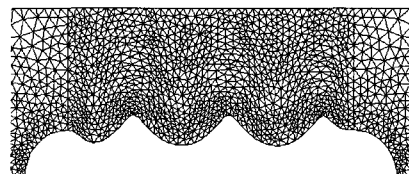
Fig. 4 Schematic for the description of the contractive and dilative motion of body

위의 식에서 trochoidal운동의 방향은 축대칭 물체가 전진하는 방향과 동일하다. trochoidal운동을 하는 표면의 격자점들은 아래 식과 같이 시간에 따라 변화하게 된다.

$$\begin{aligned} x_i^{n+1} &= x_i^n + A(x_i^n)b(\cos(kx_i^n + wt) - \cos(kx_i^n + w(t + \Delta t))) \\ y_i^{n+1} &= y_u + \frac{d^{n+1}(x_i) - y_u}{d^n(x_i) - y_u}(y_i^n - y_u) \end{aligned} \quad (5)$$

d : distance between upper wall and moving surface

Fig. 5는 1/6주기 간격으로 격자가 재 생성되어 전진을 하는 trochoidal운동을 나타낸 모습이다.



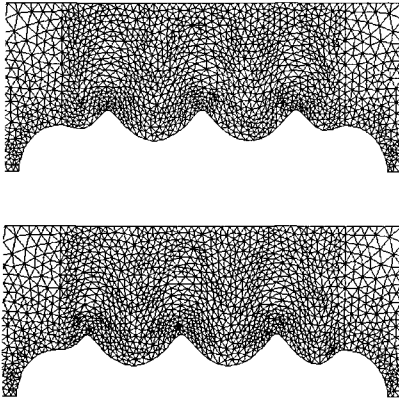


Fig. 5 Regeneration of Grid at every 60° increment over a period



Fig. 6 Description of frictional force mechanism by trochoidal motion

4.2 수축팽창 물체의 계산

계산에 사용한 수축팽창운동하는 축대칭 물체의 격자가 확대된 모습과 함께 Fig. 7와 Fig. 8에 나타나있다. 먼저 Fig. 5의 4302개의 삼각형으로 이루어진 격자를 이용하여 계산을 수행하였다.

운동을 하는 물체 표면에 집중적으로 격자를 분포시켜 계산의 효율성과 정확성을 높였으며 계산의 격자의존성을 확인하고 더 정밀한 값을 구하기 위해 더욱 조밀한 7538개의 격자를 이용해 물체를 해석하여 비교하였다.

레이놀즈수가 5, 50인 경우에 대하여 계산을 수행하였으며 결과를 속도 벡터와 압력 분포로 Fig. 9 와 Fig. 10에 각각 보였다. 이 그림들에서 trochoidal 운동에 의해 표면주위 유체가 회전하는 것을 알 수 있으며 이 유동은 추력을 얻는데 이용된다. 그러나 압력은 trochoidal 운동의 phase가 앞으로 운동하기 때문에 물체에 저항으로 작용하게 된다. 이에 대한 이해를 돕기 위하여 Fig. 5에 보

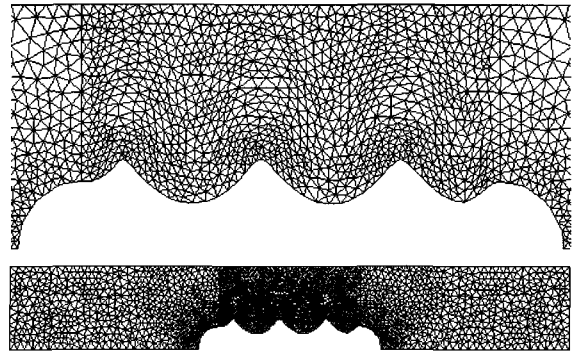


Fig. 7 Generated grid, no. of 4302

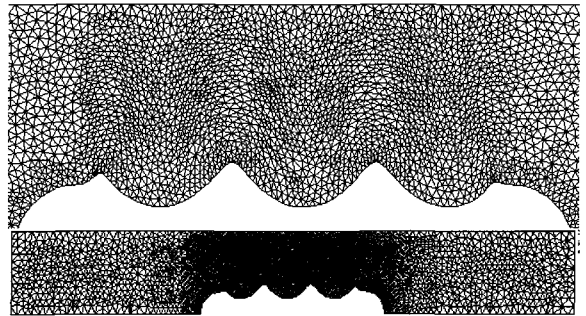


Fig. 8 Generated grid, no. of 7538

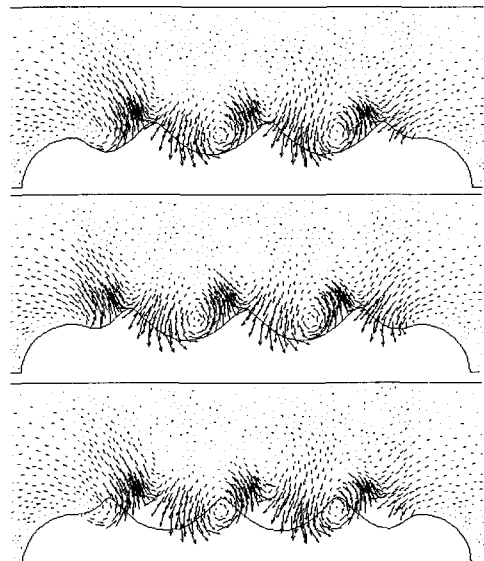


Fig. 9 Velocity vector profile according to the surface movement at every 60° increment over a period

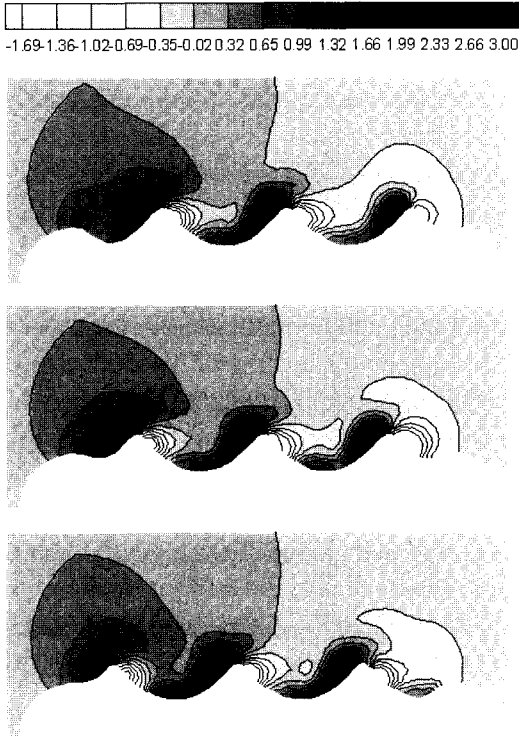


Fig. 10 Pressure contour profile according to the surface movement at every 60° increment over a period

다 상세한 그림을 도시하였으며 표면의 움직임으로 인하여 점성 저항을 진행방향의 힘으로 이용할 수 있으며 이에 대한 예로 바닥을 기어가는 뱀을 들 수 있겠다. Sinusoidal motion을 이용한 peristaltic 운동(Kim 1998)의 경우는 반대로 점성이 저항이 되고 압력에 의해 추진이 되는 예라 할 수 있다.

Table 2에는 레이놀즈수가 5와 50인 고정성에서 운동하는 축대칭물체(micro-hydro-machine)를 Cell-centered scheme을 적용하여 해석한 결과와 Nodal Scheme을 적용한 경우에 대해 서로 비교하여 보았다. 여기서 C_f 와 C_t 가 '-'인 것은 트로코이들 운동이 유입되는 유체와는 반대방향이기 때문이다. 계산 값은 최종주기 값을 여기서 평균한 것이다.

Table 2 Comparison of computed x-directional forces averaged during one cycle

Condition			C_f	C_p	C_t
Axisymmetric	Cell-centered Scheme	$R_n=5$	-1.364	1.449	0.085
		$R_n=50$	-0.162	0.536	0.374
	Nodal Scheme	$R_n=5$	-1.491	2.526	1.035
		$R_n=50$	-0.325	0.542	0.217

$$\text{여기서 } R_n = \frac{V_p L}{\nu}$$

V_p : phase velocity

L : movable part length

여기서 레이놀즈수가 50에서 5로 작아질 때 C_f 값과 함께 C_p 값이 커지게 된다. 그런데 C_f 값은 C_p 값이 커진 비율보다 더 큰 비율로 증가되었다. 즉, $R_n=50$ 에서 5로 점성이 더 높아질 때 C_p 값은 약 1.7배 증가하나 C_f 값은 약 7.4배 증가한다. 결과적으로, 점성이 높아질수록 축대칭 극소 로봇은 더 증가된 C_f 값으로 인해 더 큰 마찰력을 얻고 이 마찰력을 이용하여 더 큰 추진력을 얻게 된 것이다. 결과적으로 트로코이들 운동을 기반으로 하는 축대칭 극소 로봇의 압축팽창운동은 고정성 유체에서 추진시스템으로 활용하기에 알맞음을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of computed x-directional forces according to the grid

Cell-centered Scheme			C_f	C_p	C_t
Axisymmetric	4302 Grid	$R_n=5$	-1.364	1.449	0.085
	7538 Grid	$R_n=5$	-1.252	1.242	-0.01

Table 3에서는 기존의 4302개의 격자(Fig. 4)보다 밀도가 높은 7538개의 축대칭 극소 로봇의 격자(Fig. 5)를 사용하여 계산결과를 비교하였다. 해석값을 보면 4302개의 격자를 사용한 경우와 격자가 약 1.8배로 증가한 아주 조밀한 경우에 서로 전체적으로 큰 차이가 없으나 보다 정도 높은 결과를 얻기 위 하여는 조밀한 격자를 사용해야 함을 알 수 있다.

5. 결론

고점성 유체 내에서 축대칭 극소 로봇의 압축팽창운동의 추진을 셀 중심법(Cell-centered scheme)을 사용하여 수치적으로 해석하였다. 기존의 Nodal point scheme에 비하여 정도 높은 결과를 얻을 수 있었다.

이를 통해 압축팽창 운동을 하는 3차원 물체의 추진성능을 해석하였으며 압력이 축대칭 물체에 저항으로 작용하여 물체의 운동을 방해하지만 점성으로 인한 마찰력을 이용하여 추진력을 얻게 됨을 알 수 있었다. 그리고 레이놀즈수가 낮을수록 즉, 고점성 유체일수록 본 연구에서 제안한 방법의 추진 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

격자갯수의 영향을 확인하였으며 그 영향은 그렇게 크지 않으나 보다 정밀한 계산을 위해서는 조밀한 격자(7538개)가 필요하다.

지금까지 해석한 축대칭 물체의 압축팽창 운동은 향후 추진이 어려운 고점성유체에서 추진에 적용할 수 있는 마이크로 로봇 연구에 기초가 될 것이다. 또한 향후 3차원 물체의 추진을 해석하는 연구의 토대가 될 것이다.

후 기

이 연구는 부산대학교 학술연구조성비의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 강효길, 김문찬, 전호환, 2003, "셀중심법에 의한 축대칭 물체의 압축팽창운동에 의한 수치적인 연구," 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 330-335.

- 김문찬, 하동대, 2002, "비정규 격자를 이용한 극소 로봇의 추진 해석," 대한조선학회 논문집 제39권, 제3호, pp. 1-7.
- Alexander, R. M., 1992, "Exploring Biomechanics(animal in motion)," W.H.FREEMAN AND COMPANY, New York.
- Azuma, A., 1992, "The Biokinetics of Flying and Swimming," Springer-Verlag, New York.
- Baba, S. A., 1974, "Development changes in the pattern of ciliary reponse and swimming behavior in some invertebrate larvae," Swimming and flying in nature, Vol.1 Plenum, New York.
- Currie, I. G., 1974, "Fundamental Mechanics of Fluids," McGRAW-HILL
- Kim, M.C., 1999, "A numerical simulation for Contractive and Dilative Periodic Motion on Axisymmetric Body," Journal of Ship & Ocean Technology, Vol. 3 No. 1, pp. 1-11.
- Kim, M.C., Mori, K.h, Doi, Y., Xu, Q., 1997, "A Numerical Study on Propulsive Force by Contractive and Dilative Motion in Highly Viscous Fluid," Journal of Society of Naval Architect of Japan, Vol. 183, No. 1, pp. 27-33.
- Kim, M.C., Ninomiya, S, Mori, K.h, Doi, Y., 1998, "A Study on a Propulsion System by Peristaltic Motion in Highly Viscous Fluid," Proceeding of 21th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington D. C., pp. 111-125.
- Kim, M. C., 2001, "Simulation for the Propulsion of Micro-organism with Unstructured Grid," Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK, Seoul, pp. 226-230.
- Soh, W. Y., 1988, "Unsteady Solution of Incompressible Navier-Sokes Equation," Journal of Computational Physics, Vol. 79, pp113-134.



< 강 효 길 >



< 김 문 찬 >



< 전 호 환 >