

## 비정규 격자를 이용한 극소 로봇의 추진 해석

김문찬\*, 하동대\*

Simulation for the Propulsion of Micro-Hydro-Machine with Unstructured Grid

Moon-Chan Kim\* and Dong-Dai Ha\*

### 요 약

검증된 프로그램을 통하여 수축 팽창 운동에 대한 해석을 수행하였으며, 해석 결과 레이놀즈수가 작아지게( $Re \approx 1$ ) 되면 점성력을 이용한 추진이 효과적일 것으로 나타났고, 계산 결과를 꼭지점 법과 비교하였다.

본 연구를 통하여 극도로 점성이 큰 지역에서 통상의 추진기로 추진이 불가능한 곳에서도 추진할 수 있는 새로운 추진 시스템을 제안하였으며, 이 시스템은 micro-hydro-machine의 추진 장치로 활용될 수 있으리라 기대된다.

※Keywords: Contractive and dilative motion(컨트랙티브와 다일러티브 운동), unstructured grid(비정규 격자), highly viscous fluid(고점성 유체), micro-hydro-machine(마이크로 수중로봇)

### Abstract

Flow mechanism of contractive and dilative motion is numerically investigated to obtain a propulsive force in highly viscous fluid, which is the simulation of the propulsion in micro-organisms. The computing code for the analysis of complicated motions is developed with cell-centered unstructured grid scheme.

The developed code is validated by the well-known problems of cavity flow and oscillating wall. The validated code is applied to the contractive and dilative motion in narrow tube. The computed results are compared with nodal points scheme.

By the present results, it is found that propulsive force can be obtained by the contractive and dilative motion through simulation with the developed code.

1. 서론

최근 컴퓨터의 발달과 CFD(Computational Fluid Dynamics)의 발전(Kim, Hyoung-Tae 2001, Kim, Wu-Joan 1999)에 힘입어 그 동안 실험으로 혹은 계산으로 연구하기 어려운 분야에 대한 새로운 시도들이 계속되어지고 있다. 그 가운데 극소 생물에서 발견할 수 있는 새로운 추진 방식(Azuma 1992)은 여러 가지로 활용도가 증대되고 있는 micro-hydro-machine과 같은 로봇의 추진 기로써 활용될 수 있을 것이다. 이와 같은 추진 방식은 통상적인 추진기로써 추진이 불가능한 매우 작은 scale의 경우나 늪지나 환경 오수와 같은 극도로 점성이 큰 지역에서 작업할 수 있는 추진 시스템이 되리라 생각된다. 이와 같은 곳에서는 통상의 추진 시스템으로는 점성력이 극도로 과대해지고 또한 안전성의 문제 때문에 통상의 추진기로 추진하기가 거의 불가능하다. 새로운 추진 시스템을 해석하기 위하여 복잡한 유동의 해석에 적합한 비정규(unstructured) 격자 시스템을 사용하였으며, 이는 또한 복잡한 형상에 대하여서도 정규격자에 비하여 효과적인 해석을 수행할수 있다.

이와 같은 연구는 이미 발표한 연구들을 통해 그 가능성을 보인 바(Kim, Moon-Chan 1997, Kim, Moon-Chan 1998, Kim, Moon-Chan 1999) 있으나, 본 연구에서는 계산 기법을 nodal point 방법에서 cell-centered 방법으로 바꾸어 그 정확도를 높이고자 하였다.

새롭게 개발된 프로그램은 먼저 잘 알려진 cavity flow 문제를 통해 steady scheme에 대한 검증은 하였으며, unsteady의 경우는 bottom wall 이 oscillating 할 때의 시간 대 별로 유체 속도 profile을 exact solution과 비교함으로써 검증하였다. 검증된 프로그램은 극소 생물에서 발견할 수 있는 추진 방식인 contractive and dilative motion에 적용하여, 계산 결과를 nodal point 방법과 비교하여 보았고, 보다 정도 높은 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구를 통해 개발된 프로그램을 활용하면 극소한 곳에서나 극한의 곳에서 최적 운동 조건을

찾아 추진할 수 있으리라 생각되며, 비정규격자를 이용하여 여러 가지 복잡한 형상을 이용한 최적 추진 시스템 등을 찾는 데 이용하면 효과적으로 활용할 수 있으리라 생각된다.

2. 수식화 및 이산화

비정규 격자를 이용한 점성 유동을 해석에는 대체로 유한 체적법이 사용되고 있다. 이미 nodal point 방법에 의한 정식화는 기 발표된 문헌(Kim, Moon-Chan 1996)에 정리되어 있으며, 본 연구에서는 cell-centered 방법에 대하여 간략히 언급하고자 한다. Artificial compressibility parameter를 사용한 Navier-Stokes 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$-\frac{\partial q}{\partial \tau} + P\left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y}\right) + Q\left(\frac{\partial f_v}{\partial x} + \frac{\partial g_v}{\partial y}\right) = 0 \quad (1)$$

where

$$q = \begin{bmatrix} p \\ u \\ v \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} u \\ v^2 + p \\ uv \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} v \\ uv \\ u^2 + p \end{bmatrix} \quad f_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$g_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} \beta^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_n} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_n} \end{bmatrix}$$

여기서  $\beta$ 는 artificial compressibility parameter로서 압력과 속도를 coupling하기 위하여 사용된 변수며, 식이 수렴할 경우 연속 방정식은 원래의 식으로 복원된다.

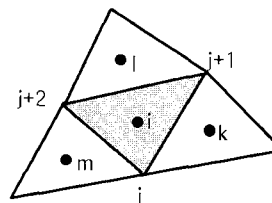


Fig. 1. Control volume for cell-centered scheme

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

$$\left( S_i \frac{q_i}{d\tau} \right) = \sum_{k=1}^{n_s} P(f_k \Delta y_k - g_k \Delta x_k) + \sum_{k=1}^{n_s} Q(f_{vk} \Delta y_k - g_{vk} \Delta x_k) \quad (2)$$

where,  $\Delta x_k = x_{j+1} - x_j$ ,  $\Delta y_k = y_{j+1} - y_j$

Nodal point 방법을 사용할 경우 한 꼭지점을 중심으로 주위의 여러 개의 삼각형 하나의 control volume을 형성하게 되나 cell-centered 방법의 경우는 Fig. 1을 통해 알 수 있듯이 하나의 삼각형이 control volume을 형성하게 되어 동일한 격자를 사용할 경우 cell-centered 방법이 nodal point 방법보다 control volume의 크기가 작아져 더 조밀한 격자를 사용하는 효과가 있을 뿐 아니라 nodal point 방법에서 나타났던 control volume이 겹쳐지는 현상이 나타나지 않는다.

또한 수치적인 발산을 방지하기 위하여 second order upwind scheme을 사용하였으며 비정상 유동의 해석을 위해서는 Soh(1988)의 방법을 사용하여 계산하였다. artificial compressibility scheme을 사용하였으므로 실제 계산에 있어서 real time과 pseudo time이 double loop로 돌아가게 된다. 이를 이산화된 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{P_i^{n+1, m+1} - P_i^{n+1, m}}{\Delta \tau} + F(u_i^{n+1, m}, v_i^{n+1, m}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{u_i^{n+1, m+1} - u_i^n}{\Delta t} + \frac{u_i^{n+1, m+1} - u_i^{n+1, m}}{\Delta \tau} + G(u_i^{n+1, m}, v_i^{n+1, m}, p_i^{n+1, m}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{v_i^{n+1, m+1} - v_i^n}{\Delta t} + \frac{v_i^{n+1, m+1} - v_i^{n+1, m}}{\Delta \tau} + H(u_i^{n+1, m}, v_i^{n+1, m}, p_i^{n+1, m}) = 0 \quad (5)$$

여기서  $\Delta t$ 는 real time을  $\Delta \tau$ 는 pseudo time을 각각 나타낸다. 또한 moving grid에 대한 보정을 위하여 잘 알려진 transport theorem을 이용한 보정을 하였다(Kim, Moon-Chan 1996).

Cell-centered 방법에 의한 해석의 경우 vertex point에서의 값들을 직접 계산할 수 없으므로 cell-center의 값을 이용하여 내삽하여 구해야 한다. 본 연구에서는 불균일 격자에 효과적으로 사용할 수 있는 Laplacian weighted averaging scheme(Rausch 1992)을 사용하여 각 vertex point에서 값을 계산하였다.

### 3. 프로그램 검증

개발된 프로그램은 먼저 잘 알려진 cavity flow 문제로 정상류에서의 해석에 대한 검증과 비정상류에 대하여는 exact solution이 있는 oscillating wall의 문제로 검증하였다. 계산에 사용된 레이놀즈 수는 각각 100과 10이며 수렴이 될 때까지 반복 계산을 수행하였다. 본 연구에서는 explicit scheme을 사용하였기 때문에 격자 사이즈에 맞는  $\Delta t$ 를 기준 Curant number(CFL)에 맞게 결정하였으며, 기준이 되는 Curant 수는 대략 0.3 근처에서 결정하였다.

먼저 cavity flow 계산에 사용된 격자를 Fig. 2에 보였다. 전체 삼각형 격자수는 3300개이고 계산점은 레이놀즈 수 100에서 수행하였다. 계산 결과를 속도 벡터로 Fig. 3에서 보였다. 기존 계산 결과들(Kim, Moon-Chan 1996)과 비슷한 모습을 보이고 있다.

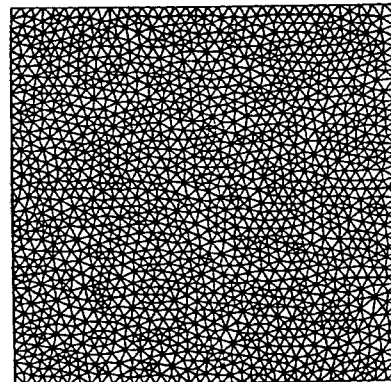


Fig. 2. Generated unstructured grid for the cavity flow

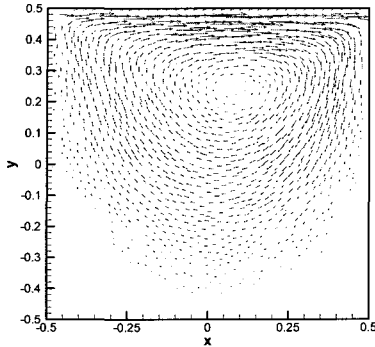


Fig. 3. Computed results of velocity vector at  $Re=100$

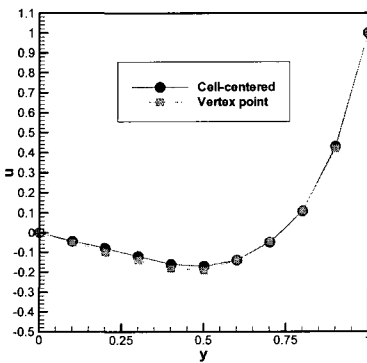


Fig. 4. Comparison of computed  $u$ -velocity at center,  $Re=100$

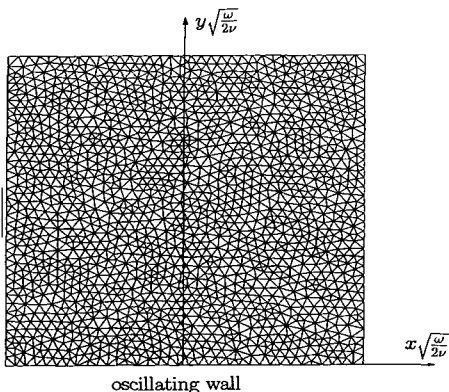


Fig. 5. Generated grid and coordinate for an oscillating wall below a viscous fluid

Nodal point를 사용한 결과와 보다 엄밀한 비교를 위하여 중앙에서 연직 상 방향으로  $x$  방향 속도를 Fig. 4에 비교하여 보였으며, 대체적으로 서로 잘 일치하는 모습을 볼 수 있다.

비정상 유동 해석에 대한 검증에 사용된 oscillating wall에 관한 문제는 Fig. 5에서 보인 격자를 이용하여 레이놀즈 수 10에서 계산하였다. 주기를 60도로 등분하여 Oscillating하는  $x$  방향의 속도를 계산결과와 exact solution (White 1974) 과 Fig. 6에서 비교하였다. Side 쪽의 경계조건은 exact solution의 결과를 이용하여 주어졌으며, 계산결과 전체적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

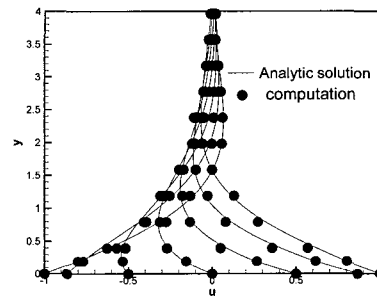


Fig. 6. Velocity profiles due to an oscillating wall (curves shown for every  $30^\circ$  increment over half period)

#### 4. 협소한 관로 속에서의 contractive and dilative 운동

본 연구는 점성이 크고 협소한 인체의 혈관이나 여러 가지 오물이 가득한 관로에서의 추진 시스템을 개발하는 것이 목적이다. 이러한 곳에서의 추진은 통상의 프로펠러와 같은 추진기는 점성 저항을 이기기 어려울 뿐 아니라 외벽이 가까워 손상의 우려도 있게 된다. 관로에서의 해석은 삼차원적으로 이루어져야하나 본 연구에서는 먼저 이차원적으로 해석하고 이를 토대로 삼차원 해석을 수행할 예정이다. Contractive and dilative motion은 peristaltic 운동과 비슷하나 후자가 sinusoidal한 운동을 이용한 것이라면, 전자는 trochoidal한

운동으로 마치 뱀이 바닥의 마찰력을 이용하여 전진하는 개념과 비슷하다 할 수 있겠다. 계산에 사용된 레이놀즈 수나 격자는 혈관에서의 초소형 로봇의 추진을 염두에 두고 결정되었다. 즉 레이놀즈 수는 운동을 하는 부분의 길이와 표면에서의 phase velocity( $V_p$ )에 의해 결정되었으며 이를 토대로 대략 계산하면 레이놀즈 수가 약  $1 \sim 50$  정도가 되리라 보고 1, 5 그리고 50에서 각각 계산을 수행하였다.

#### 4.1 Contractive and dilative 운동

본 연구에서는 이차원으로 문제를 해석하였으며 향후 이 연구를 토대로 축 대칭과 삼차원 문제를 해석할 예정이다. Fig. 7은 contractive and dilative 운동에 의한 추진을 계산하기 위한 각각의 변수들을 정의한 모습을 보여 주고 있으며, 이에 대한 구체적인 식은 식 (6) - (7)에 정리하였다.

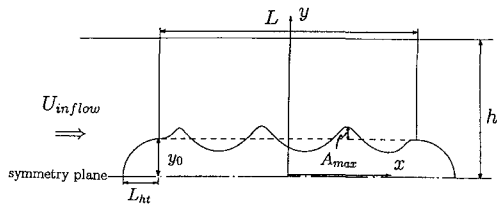


Fig. 7. Schematic for the description of the contractive and dilative motion of body

$$x' = x + A(x)b\cos(kx + \omega t)/L \quad (6)$$

$$y = y_0 + A(x)\sin(kx + \omega t)/L \quad (7)$$

여기서  $x, y$ 는 운동하는 표면에서의 위치를 나타내며,  $x$ 는 기준이 되는  $x$  방향 변위를 그리고  $x'$ 과  $y$ 는 운동을 시작한 후의 각각의 변위를 의미한다.  $k$ (wave no.),  $\omega$ (frequency),  $b$ (amplitude of trochoidal motion, Spiegel, 1968) 그리고  $y_0(=Lh_t)$ 는 각각  $6\pi, 6\pi, 0.5$  그리고  $0.15$ 를 각각 사용하였으며  $U_{inflow}$ 는 phase velocity의  $1/20$ 로 하여 계산하였다.

로봇의 표면이 운동을 함에 따라 격자가 이동하게 되는데 이에 대한 매 시간 별 격자 재생성은

다음에 보이는 식을 사용하여 전체적으로 매끈하게 변화되도록 하였다.

$$\begin{aligned} x_i^{n+1} &= x_i^n + A(x_i^n)b(\cos(kx_i^n + \omega t) \\ &\quad - \cos(kx_i^n + \omega(t + \Delta t))) \\ y_i^{n+1} &= y_n + \frac{d^{n+1}(x_i) - y_u}{d^n(x_i) - y_u}(y_i^n - Y_u) \end{aligned} \quad (8)$$

격자 이동에 따른 보정은 앞에서 언급한 바와 같이 transport theorem을 이용하였다.

#### 4.2 계산 결과

계산에 사용된 격자를 Fig. 8에 보였다. 삼각 격자 수는 대략 4300개이고 운동의 변화가 심한 물체 표면에 많은 수의 격자를 분포 시켰다. 이렇게 국부적으로 격자를 집중시킬 수 있는 점이 정규 격자 시스템에 비하여 비정규 격자의 장점이라 할 수 있겠다. 본 계산의 경우라면 정규 격자를 사용한 계산이 가능하리라 생각되나, 향후 표면을 매우 복잡한 형상으로 만들어 가며 효율을 극대화할 수 있는 최적 형상을 도출할 예정이다(Kim, Moon-Chan 1998). 계산은 레이놀즈 수 1, 5 그리고 50에서 각각 수행하였으며 계산된 결과를 속도 벡터와 압력 분포에 대하여 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 trochoidal 운동에 의한 복잡한 유동 현상을 볼 수 있으며 압력의 경우 전진하는 방향에 저항하는 압력이 예상대로 높게 나타나고 있어 압력에 의한 힘이 저항이 됨을 알 수 있다. 물체 표면에서의 점성력과 압력에 의한 힘을 Table 1에 정리하였으며, 비교를 위하여 nodal point 방법에 의한 결과를 함께 보였다. cell-centered 방법의 결과에 의하면 레이놀즈 수가 10이 되면 점성력에 의한 추력이 압력에 의한 저항보다 커 전진 속도가 phase velocity의  $1/20$  이상이 될 수 있음을 알 수 있다. 전체적으로 cell-centered 방법과 nodal point 방법에 의한 결과가 다소 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다. 실험 결과가 없기 때문에 두 결과에 대한 정도의 우수성을 언급하기는 어려우나 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 nodal point의 방법에 의한 결과가 수렴도도 좋지 못하고 앞에서 언급한 바와

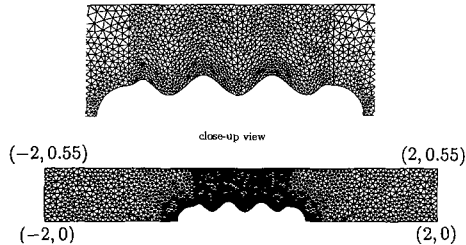


Fig. 8. Generated grid for the computation of contractive and dilative motion in narrow channel

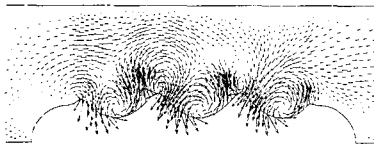


Fig. 9. Computed velocity vector around a body in narrow channel at  $Rn=5$

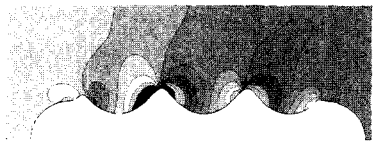


Fig. 10. Computed pressure contour around a body in a narrow channel at  $Rn=5$

Table 1. Computed results of x-directional forces on body in narrow channel

Conditions		$C_f$	$C_p$	$C_t$
Cell-centered	$Rn=1$	-5.75	2.90	-2.85
	$Rn=5$	-1.60	2.35	0.75
	$Rn=50$	-0.21	0.93	0.72
Vertex point	$Rn=1$	-7.56	4.25	-3.31
	$Rn=5$	-2.19	2.62	-0.43
	$Rn=50$	-0.16	0.83	0.67

같이 협소한 관로 속에서의 계산에 있어서 control volume이 overlapping된단든지, 격자 수가 충분하지 못하다든지 하는 여러 가지 면에서 볼 때

cell-centered 방법이 우수하리라 예측된다.

이와 같은 결과에 대한 보다 엄밀한 검증은 실험 등에 의해 가능하리라 생각된다. 실제로 시험을 수행하기 위해서는 레이놀즈 수를 맞추기 위한 고정성 유체가 필요할 것이며, 또한 trochoidal 운동을 구현할 수 있어야 한다. 향후 이러한 문제들을 극복하여 실험에 의한 연구를 병행하게 되면 보다 정도 높은 추진 시스템을 완성할 수 있으리라 생각된다.

여기서

$$C_f = \frac{1}{R_n} \int_0^{L^*} \frac{d\left(\frac{u}{V_p}\right)}{d\left(\frac{y}{L}\right)} dl \quad (9)$$

$$C_p = \frac{1}{\rho V_p^2} \int_0^{L^*} p dl \quad (10)$$

$$C_t = \frac{F_t}{\rho V_p^2 L} \quad (11)$$

$L^*$ 는 전체 적분 영역,  $V_p$ 는 phase velocity 그리고  $F_t$ 는 전체 힘(x 방향)을 의미한다.



Fig. 11. Computed pressure contour by nodal point method

## 5. 결론

고점성 유체내에서 작업을 수행할 수 있는 로봇의 추진 시스템에 대하여 수치적으로 연구를 수행하였다. 복잡한 운동을 해석하기 위하여 비정규격자를 이용하였으며, 유한 체적법을 이용한 cell-centered scheme으로 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 잘 알려진 캐비티 문제와 oscillating wall 문제로 정상 상태와 비정상 상태에서 각각 검증하였으며 검증된 프로그램은 본 연

구에서 제안한 추진 시스템인 contractive and dilative 운동에 적용하였다. 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 레이놀즈 수에 따라 점성력과 압력에 의한 힘의 비율이 크게 달라지며 레이놀즈 수가 적을수록 예상대로 점성력이 커진다.
- 고 점성 유체( $Rn=1$ )내에서 로봇 표면을 trochoidal한 운동으로 움직이면 점성력을 이용하여 phase velocity의 1/20 이상의 속도를 얻을 수 있다.
- 본 연구에서 개발한 cell-centered scheme의 경우 nodal point 방법보다 정도 높은 결과로 사료되며 향후 실험 등의 방법에 의한 더 엄밀한 검증이 필요하리라 생각된다.
- 본 연구를 통하여 micro-hydro-machine (robot)에 대한 새로운 추진 시스템을 제안하였으며, 최적 운동 모드 등에 대한 연구가 진행되면 보다 효율적인 추진 시스템이 완성될 수 있으리라 생각된다. 또한 이러한 결과들이 실험에 의해 검증되고, 실제적인 적용에 있어서의 문제점들을 해결하면, 여러 분야에서 활용도가 높은 추진시스템이 되리라 생각된다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단의 신진 연구 사업으로 수행되었으며 관련 제위께 감사드립니다

참 고 문 헌

- Kim, Hyong-Tae and Kim, Jeong-Jung, 2001, "Computation of Four Quadrant Performance for Marine Propeller in Open Water", J. of The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 4, pp1-10.
- Kim, Wu-Joan, etc. 1999, "Development of 3-D Field Grid Generating Method for Viscous Flow Calculation around a Practical Hull Form", J. of The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 1, pp70-81
- A. Azuma, 1992, "The Biokinetics of Flying and Swimming", Springer-Verlag.
- Kim, Moon-Chan, S. Ninomiya, K. Mori, Y.

Doi, 1997, "A Numerical Study on Propulsive Force by Contractive and Dilative Motion in Highly Viscous Fluid", J. of Society of Naval Architect of Japan, Vol. 183, No. 1.

- Kim, Moon-Chan, etc., 1998, "A Study on a Propulsion System by Peristaltic Motion in Highly Viscous Fluid", Proceeding of 21th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington D.C.
- Kim, Moon-Chan, 1999, "A Numerical Simulation for Contractive and Dilative Periodic Motion on Axisymmetric Body", J. of Ships and Ocean Technology, Vol. 3, No. 1.
- Kim, Moon-Chan, etc. 1996, "A Numerical Scheme with Unstructured Moving Grid System and Its Application to Two-Dimensional Complicated Flows", J. of Society of Naval Architect of Japan, Vol. 181, No. 1.
- W. Y. Soh, and J. W. Goodrich, 1988, "Unsteady Solution of Incompressible Navier-Sokes Equation", Journal of Computational Physics, Vol. 79, pp113-134.
- R. D. Rausch, 1992, "Spatial Adaptation of Unstructured Meshes for Unsteady Aerodynamic Flow Computation", AIAA Journal Vol. 30, No. 5.
- F. M. White, 1974, "Viscous Fluid Flow", McGraw-Hill, NY pp. 148-149.
- M. R. Spiegel, 1968 "Mathematical Handbook", Schaum's Outline Series p. 42
- Kim, Moon-Chan, etc. 1998, "A Numerical Study on Propulsion in Highly Viscous Fluid by Contractive and Dilative Motion of Body, Thesis of Doctor Degree, Hiroshima University.



< 김 문 찬 >



< 하 동 대 >