대 한 조 선 학 회 논 문 집
제39권 제4호 2002년 11월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 39, No. 4, pp.11-16, November, 2002

Peristaltic 운동을 이용한 추진에 대한 연구

김 문 찬*

Analysis for the Propulsion with Peristaltic Motion

Moon-Chan Kim*

요 약

고점성 유체내에서의 추진력을 얻기 위하여 Peristatic 운동에 의한 추진을 실험적, 수치적 방법으로 연구하였다. 운동을 수치적으로 해석하기 위하여 비 정규격자를 사용한 셀 중심법을 이용하여 해석하였다. 실험을 위하여 작은 수조를 만들었으며 모형을 끌 수 있는 전차와 고점성 액체인 그리세린을 사용하여 Peristaltic 운동을 구현하였다. 여러 조건 하에서 실험을 수행하였으며, 여러 실험 결과 중에서 가장 비교가 용이한 정지 상태에서 실험한 결과에 대하여 개발된 프로그램을 이용한 해석 결과와 비교하였다. 해석 결과는 실험 결과와 좋은 일치를 보였다. Peristaltic 운동은 압력 차를 이용하여 추진력이 얻어짐을 계산을 통하여 보였으며 더 많은 계산을 통하여 최적 운동 조건이나 Peristatic 운동이 효과적인 영역(레이놀즈 수) 등을 찾아낼 수 있으리라 생각된다.

※Keywords: Peristaltic motiom (페리스탈틱 운동), high viscous fluid (고점성 유체),unstructured grid (비정규 격자), cell-centered scheme (셀 중심법)

Abstract

Flow mechanism of peristaltic motion is numerically and experimentally investigated to obtain a propulsive force in highly viscous fluid. Computing code for the analysis of the motions is developed with cell-centered unstructured grid scheme. The computed results by the developed code is compared with the experimental results which have been carried out to find out the propulsion mechanism in highly viscous fluid. The computed results shows good correlation with the experimental results and further the propulsive force can be obtained by sinusoidal motion which makes a pressure difference on waving surface. The more computation with variation of Reynolds number and parameters of motion is expected for finding a proper working range.

접수일자: 2002년 6월 17일, 승인일자: 2002년 11월 12일

* 주저자, 정회원, 부산대학교 조선해양공학과 (E-mail: kmcprop@pusan.ac.kr)

1. 서론

최근 컴퓨터의 발달과 CFD(Computational Fluid Dynamics)의 발전에 힘입어 새로운 분야에 대한 계산들이 계속되어지고 있다.(Barth 1991, Kim, H-T 2001, Kim, W-J 1999). 극소 생물에서 발견할 수 있는 새로운 추진 방식(Azuma 1992)은 여러 가지로 활용도가 증대되고 있는 micro-hydro-machine과 같은 로봇의 추진기로써 활용될 수 있을 것이다. 이와 같은 추진 방식에 대한 연구는 기 발표된 논문들(Kim 1997, Kim 1998, Kim 2001)에 정리되어 있으며 또한 micro, nano 기술에 대한 관심이 고조됨에 따라 앞으로도 계속 증가되리라 생각된다. 이와 같은 복잡한 trochoidal 운동의 계산에 대하여는 실험에 의한 검증이 매우 어렵다. 이러한 복잡한 운동을 기 연구에서 contractive and dilative 운동이라 명명하였으며 고 점성 유체 내에서 효과적인 추진 방식임을 계산을 통해 밝힌 바 있으나 실험적인 규명은 복잡한 운동에 대한 재현의 어려움으로 이루어지지 못하였다. Contractive and dilative 운동과 유사한 추진 방식으로 sinusoidal 운동을 이용한 peristaltic 추진 방식을 들 수 있다. 이 추진 방식의 경우도 비교적 레이놀즈 수가 낮은 곳에서 사용될 수 있다.

본 연구에서는 peristaltic 운동에 대한 해석을 수행하여 실험 결과와 비교하고 해석 시스템을 검증하였다. 이는 또한 간접적으로 contractive and dilative 추진에 대한 검증으로 이어질 수 있을 것으로 생각된다. 본 peristaltic 운동을 이용하여 통상적인 추진기로써 불가능한 늪지에서의 추진이나 환경 오수 정화선과 같은 개념의 선박 추진에 이용할 수 있으리라 생각된다.

새로운 추진 시스템을 해석하기 위하여 비정규 격자를 이용한 해석 시스템을 사용하였으며 셀 중심법을 이용하였다.

본 해석 시스템을 이용하여 보다 다양한 레이놀즈 수에서와 sinusoidal운동의 조건들에서 계산을 수행해 나간다면 peristaltic 운동의 효과적인 적용 범위와 최적 운동 조건 등을 찾아낼 수 있으리라 생각된다.

2. 실험적 연구

고 점성 유체 내에서의 peristaltic 운동에 의한 추진을 실험적으로 연구하기 위하여 작은 예인수조에서 모형을 제작하여 sinusoidal 운동에 의한 추진을 구현하였다(Kim 1998). 모형과 구동 장치 및 계측 장비 등으로 구성되어 있는 전체 모습을 Fig.1에 보였다. 소형 예인 수조의 제원은 L × B × D가 1.5m × 1.0m × 0.2m이며 고 점성 유체를 만들기 위해 글리세린을 사용하였다. sinusoidal 운동을 이용한 실험 조건을 Table 1에 보였으며 파장(λ) 및 진폭은 각 각 0.24m 와 0.01m로 하였으며 밑판과 파면의 간극은 0.02m로 하였다. 특히 peristaltic 운동에서는 이 간극이 성능에 중요한 인자가 되며 레이놀즈 수를 정의하는 데 길이 무차원화 계수로 사용되어졌으며 속도는 위상속도를 사용하였다. 즉 레이놀즈 수(R_h)는 $V_p h/v$(V_p: 위상속도, h: 깊이, v: 동점성계수)로 정의하였다. 힘 계측에는 세 방향의 힘을 계측할 수 있는 동력계를 사용하였다.

실험은 위상속도와 모형선 속도를 변화 시켜가며 수행하였으며 실험 조건을 Table 1에 정리하였다. 글리세린을 희석시켜 동점성이 다른 두 가지 종류의 액체에서 실험을 수행하였다.

먼저 모형선의 속도를 0으로 하고 위상속도를 변화시켜가며 계측된 x방향(모형선 진행 방향: + 추력)의 힘을 Fig. 2에 보였다. 압력에 의한 힘을 추진력으로 사용하기 위하여 위상속도 방향은 모형선 진행 방향의 반대 방향으로 하여 실험하였

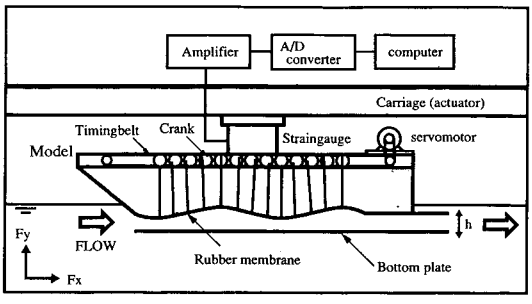

Fig. 1 Experimental set-up for measuring force

Table 1 Experimental conditions for measuring force

kinematic viscosity(m^2/s)	phase velocity (m/s)	model speed (m/s)
3.96 X 10^{-5}	0.24	0
	0.48	0.02
	0.72	0.03
		0.04
2.38 X 10^{-3}	0.12	0
	0.24	0.005
	0.32	0.010
		0.015

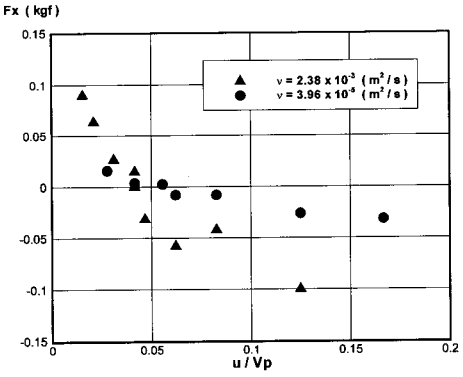

Fig. 2 Measured force acting on the model according to the variation of phase velocity at zero model speed

다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 위상속도(v_p)의 증감에 따라 모형선의 추진력이 선형적으로 변화되는 모습을 보여주고 있다.

Fig. 3에서는 모델 속도를 위상속도로 무차원화하여 이를 기준으로 계측된 힘을 전부 도시하였다. 전체적으로 다소 실험치가 분산되는 경향이 있으나 위상속도가 모델 속도의 약 20배가되면 힘이 0이 되어 평형을 이룸을 알 수 있다. 즉 모형선의 속도는 위상속도의 약 1/20배 정도가 됨을 알 수 있다.

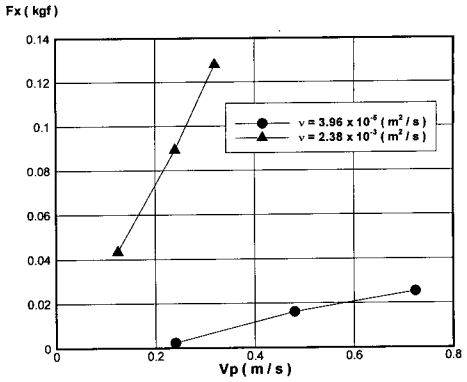

Fig. 3 Measured force acting on the model according to the ratio(u/v_p) of model speed and phase velocity

3. 수식화 및 이산화

peristaltic 운동에 대한 이론적 해석을 위하여 비정규 격자를 이용한 셀 중심법의 유한 체적법을 사용하였다. 인공압축변수(artificial compressibility parameter)를 사용한 Navier-Stokes 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서

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

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

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

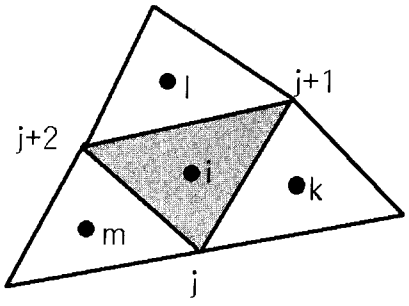

Fig. 4 Control volume for cell-centered scheme

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

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

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

또한 수치적인 발산을 방지하기 위하여 이차 풍상 방법을 사용하였으며 비정상 유동의 해석을 위해서는 Soh(1988)의 방법을 사용하였다.

본 장에서는 수치해석을 이용하여 peristaltic 운동을 해석하여 보았다. 실제로 실험 결과와의 엄밀한 비교를 위해서는 삼차원 해석을 수행하여야 하나 비교적 이차원 운동에 가깝고 또한 옆 벽면에 대한 점성력만 보정해주면 이차원으로 해석한 결과와 비교가 가능하리라 생각된다. 본 연구에서는 모델의 속도가 0인 경우에 대한 계산을 수행하여 실험 결과와 비교하였다.

4.1 peristaltic 운동

앞서 언급한 바와 같이 peristaltic 운동은 sinusoidal 운동에 의해 구현되어지며 본 연구에서는 Fig.5에 보인 바 같이 정의하여 계산하였으며 표면 운동의 식은 (3) 식과 같이 나타낼 수 있다.

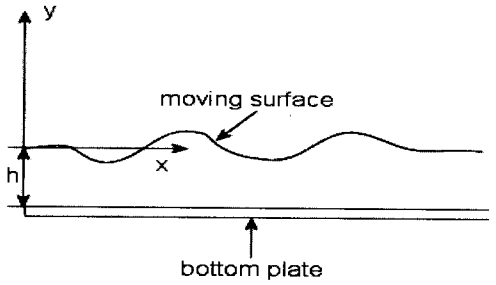

Fig. 5 Schematic for the description of the sinusoidal motion

$$y = A(x)\sin(kx - wt) \quad (3)$$

여기서 k=4π/L, ω=4πV$_p$/L 그리고 길이는 전부 깊이 h로 무차원화하여 사용하였다.

운동을 함에 따라 격자가 이동을 하게 되는 데 이에 대한 매 타임 별 격자 재생성은 다음에 보이는 식을 사용하여 변화되도록 하였다.

$$y_i^{n+1} = y_i^n + \frac{h^{n+1}(x_i) - y_u}{h^n(x_i) - y_u}(y_i^n - y_u) \quad (4)$$

여기서 yu는 운동하는 표면의 y좌표를 나타낸다.

격자 이동에 따른 보정은 transport theorem을 이용하였다.

4.2 계산 결과

계산에 사용된 격자를 Fig. 6에 보였다. 상각 격자 수는 5080개이고 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. 계산은 고정성 유체를 사용한 실험 점 즉 레이놀즈 수 1, 2 그리고 2.67에서 수행하였으며 계산된 결과를 속도 벡터와 압력 분포에 대하여 Fig. 7 와 Fig. 8에 각 각 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 sinusoidal 운동에 의한 유동 현상을 볼 수 있으며 압력의 경우 골과 간을 경계로 양의 압

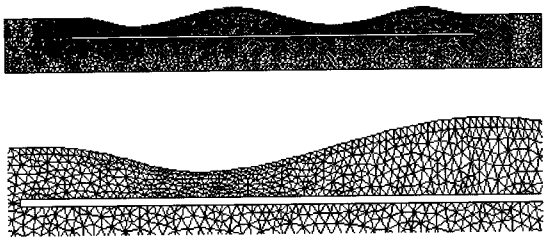

Fig. 6 Generated grid for the peristaltic motion

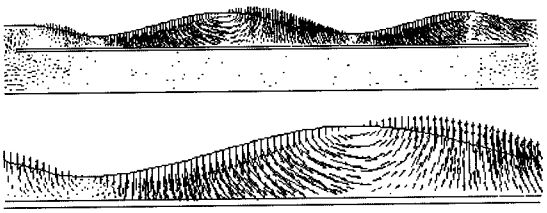

Fig. 7 Computed velocity vector at R_n=1

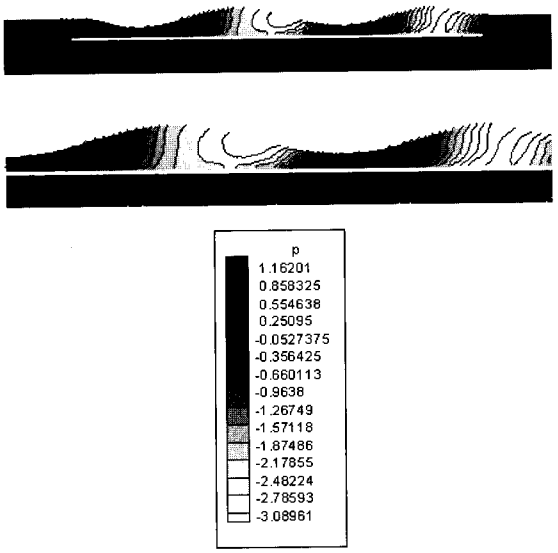

Fig. 8 Computed pressure contour at R_n=1

력과 음의 압력의 변화가 분명히 나타나고 있으며 이를 통해 추력을 얻고 있음을 알 수 있다. 모형선에 작용하는 x-방향의 힘을 Table 2에 실험 결과와 함께 정리하였다. 여기서 사용된 무차원화 계수는 다음과 같이 정의하였다.

$$C_f = \frac{1}{R_n}\int_0^{\frac{L}{h}} \frac{d(\frac{u}{V_p})}{d(\frac{y}{h})}\, t \cdot dl \qquad (5)$$

$$C_p = \frac{1}{\rho\ V_p^{\,2}}\int_0^{\frac{L}{h}} pt \cdot dl \qquad (6)$$

$$C_t = \frac{F_t}{\rho\ V_p^{\,2} h} \qquad (7)$$

여기서 R_n은 레이놀즈 수, L은 전체 모형선의 유체와 접한 부분의 적분 경로의 길이를, dl은 적분 변수벡터를, y는 Fig. 5에서 정의된 값을, t는 x 방향 벡터를 그리고 F_t는 x 방향의 전체 힘을 나타낸다.

계산과 실험의 비교를 위하여 실험치의 경우 폭은 단위 길이로 환산하여 비교하였다. 계산의 경우도 실험과 마찬가지로 위상속도의 변화 즉 레이놀즈 수의 변화에 따라서 선형적으로 변화되고 있으며 수치 계산의 경우가 약간 작은 값을 보이고 있으며 레이놀즈 수가 적을수록 차이가 다소 많이 나는 것으로 나타나고 있다. 이는 본 계산에 적용한 압력 조건 때문인 것으로 사료되며 본 연구에서 사용한 압력에 대한 경계 조건인 d_p/d_n=0 이 레이놀즈 수가 적을 경우 고차항을 고려하지 않은 에러가 나타나는 것으로 생각된다. 향후 압력 경계 조건을 변화하여 계산할 예정이다.

Table 2 Computed results of x-directional forces

Conditions		C_f	C_p	C_t
Computation	R_n=1	-2.88	6.75	3.87
	Rn=2	-1.10	3.28	2.17
	R_n=2.67	-0.81	2.45	1.64
Experiment	R_n=1	-	-	4.27
	R_n=2	-	-	2.30
	R_n=2.67	-	-	1.71

5. 결론

고점성 유체내에서 peristaltic 운동에 의한 추진을 수치적으로 해석하고 실험과 비교하였다. 해석을 위하여 비정규격자를 이용하였으며 유한 체적법을 이용한 셀 중심법으로 프로그램을 개발하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 위상속도에 따라 추진력이 비례적으로 변하며 본 연구에서 실험하고 계산한 영역(R_n=1~2.67)에서는 압력에 의해 추진력을 얻을 수 있음을 확인하였다.
- 수치계산 결과와 실험 결과와는 대체적으로 일치하나 레이놀즈 수가 적을수록 차이가 벌어지고 있으며 이는 압력의 경계조건 식을 보완할 필요가 있을 것으로 생각된다.
- 고점성 유체내에서 peristaltic 운동에 의한 추진이 점도가 커질 경우 어느 영역까지 사용이 가능한지 그리고 그와 같이 굉장히 마찰력이 커질 경우에 대한 최적 운동 방법 등에 대한 연구가 계속되어 져야하리라 생각된다.
- 향후 실험과의 보다 엄밀한 비교를 위하여 유동 모습 그리고 모우멘텀 플럭스 등에 대한 비교를 수행할 예정이며 계산 방법에 대하여도 보다 정도를 높일 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

참 고 문 헌

- A. Azuma (1992), "The Biokinetics of Flying and Swimming", Springer-Verlag.
- Barth, T. J. (1991), "Numerical Aspects of Computing Viscous High Reynolds Number Flows on Unstructured Meshes, AIAA paper 91-0721
- Kim, Hyoung-Tae / 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, Moon-Chan, etc. (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 (2001), "Simulation for the Propulsion of Micro-organism with Unstructured Grid", Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK, Seoul.
- 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
- W. Y. Soh (1988), "Unsteady Solution of Incompressible Navier-Sokes Equation", Journal of Computational Physics, Vol. 79.

< 김 문 찬 >