



맥동류 내 물체 형상에 따른 항력에 대한 CFD 계산

황도연¹, 한병윤¹, 유성수¹, 이명수¹, 박형구^{*2}

CFD ANALYSIS FOR THE DRAG OF AN INTERIOR BODY IN A PULSATILE FLOW WITH VARIOUS SHAPE DESIGN

D.Y. Hwang¹ and H.K. Park^{*2}

The objective of this study is to get a fundamental data for the shape of a robot which operates in blood vessels. The overall analysis was calculated with a CFD code. The flow was idealized as a pulsatile flow, and first the robot was assumed as a simple capsule model. Then a drag of the body in the flow was calculated, and this process was repeated, varying the shape.

To validate all the result, the pulsatile velocity simulation was compared with the theoretical data, and the drag of a body was compared with the existing data of the other papers first. Then with the next calculation the guideline for the design of robot shape was presented.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 비정상유동(Unsteady Flow), 맥동류(Pulsatile Flow), 항력(Drag)

1. 서 론

과학 기술의 발전은 기계 장비와 전자 회로의 정밀화 및 소형화를 가져왔으며, 이로 인해 초소형 로봇의 개발도 가능하게 되었다. 특히 의학계에서는 수술 절개 부위를 최소화하는 최소 침습술(MIS: Minimally Invasive Surgery)이 선호되면서, 의학적 시술에 소형 로봇을 적용하려는 시도가 늘고 있다. 2001년 인체 내부 진단용으로 개발된 소형 알약 형태의 카메라 로봇(Camera pill)과 2008년 필립스 연구소에서 발표한 로봇 형태의 치료용 알약 Ipill이 그 예이다.

현재 로봇 시술은 내시경을 대신하는 진단과, 절개 수술을 대신하는 수준에 있으나, 기술이 더 발전한다면 보다 더 작은 혈관에 삽입되는 로봇을 개발할 수 있을 것이다 실제로 국내에서는 동맥경화, CTO와 같은 혈관 질환을 치료하기 위한 소형 로봇 개발이 시도되고 있다.

혈관 내에 삽입된 소형 로봇은 관내 유동 내부에서 유영하는 물체로 가정할 수 있으므로, 유체역학적으로도 흥미로운

문제라고 할 수 있다. 특히 혈류는 신체 각 부위 뿐만 아니라 시간에 따라서도 압력이 변하는 맥동류이므로, 내부 물체의 운동을 계산하기에는 어려움이 있다. 그러나 관내 유동에 응용된 로봇에 대한 최근의 국내 연구는 산업적인 응용[1]과 의공학용 로봇의 추력 메커니즘 개발[2]에 한정되어 있다.

따라서 본 연구에서는 혈류를 이상화하여, 분지관의 맥동류 중앙에 위치한 물체의 항력이 형상에 따라 어떻게 달라지는지 그 경향을 조사하였다.

2. 모델링 및 경계조건

2.1 모델링 제원

본 연구에서 사용된 분지관과 내부 물체의 해석 모델은 Fig. 1,2와 같다. 모관의 직경은 3 mm, 길이는 150 mm로 하였다. 또한 물체가 삽입되는 분지부를 중앙에 있도록 하여, 입출구 유동이 해석에 영향을 미치는 영향을 최소화 하도록 하였다. 보통 혈관의 직경은 대동맥이 16~32 mm의 값을 취하며, 동맥이 2~6 mm의 값을, 모세혈관들이 5~10 μm의 값을 취한다[3]. 본 논문에서는 일반 동맥에 해당하는 범위에서 대퇴동맥(feomoral artery) 및 관상동맥(coronary artery)에 해당하는 3mm를 취하였다. 내부 물체는 이 분지관에서 이동과 회전에

1 학생회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 전남대학교 기계시스템 공학부

* Corresponding author, E-mail: bluehty@naver.com

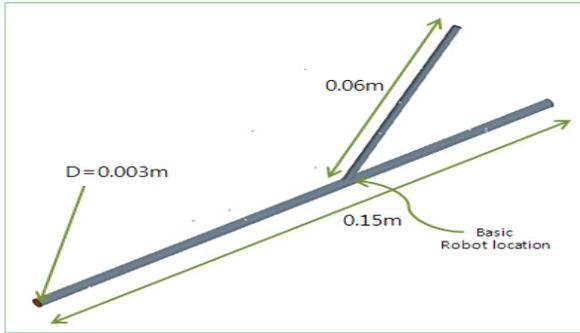


Fig. 1 Bifurcated tube model geometry.

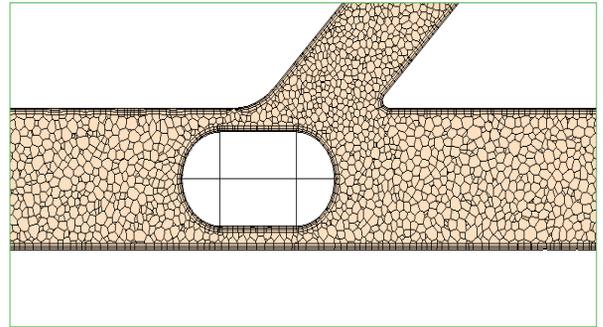


Fig. 3 Mesh geometry of a bifurcate tube and a body model.

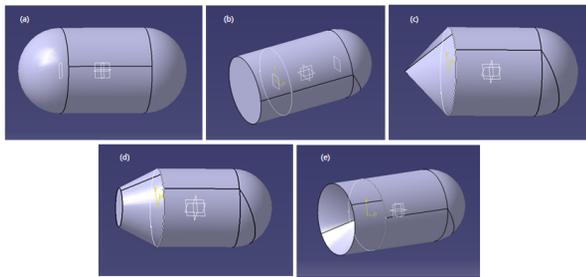


Fig. 2 Frontal face shapes of robot model.

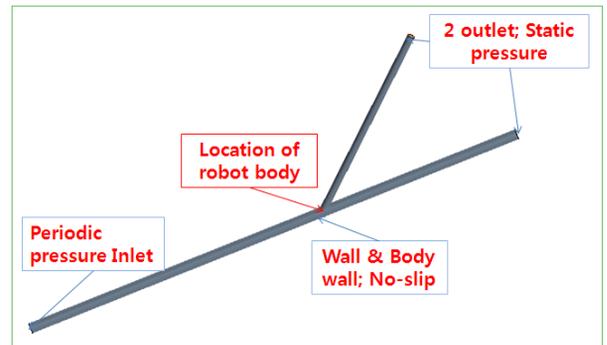


Fig. 4 Boundary conditions of model.

용이하도록 직경 0.75 mm, 전체 길이 1.75 mm가 되도록 하였다.

또한 일반적인 동맥의 유량과 직경 사이의 관계를 이용하여, 분지각과 분지 직경비 사이의 관계를 지은 Murray's Law를 이용하여 45도 분지관을 하였다[4]. 이때 분지비는 0.7206이 되며, 식의 상세한 기술은 다음과 같다.

$$\cos \theta = \frac{\alpha_0^4 + \alpha_1^4 - (\alpha_0^3 + \alpha_1^3)^{4/3}}{2\alpha_0^2\alpha_1^2} \quad (1)$$

2.2 지배방정식 및 난류 모델

분지관 유동은 비압축성 난류로 가정하였으며, 난류 모델은 k-ε 모델을 사용하였다. 이때 사용되는 유동 지배 방정식과 난류 모델은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_j}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \eta \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k^2} \right) + f_{x_k} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

여기서 각 항 및 상수는 다음과 같이 표현된다.

$$P_k = - \overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (7)$$

$$\beta = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad (8)$$

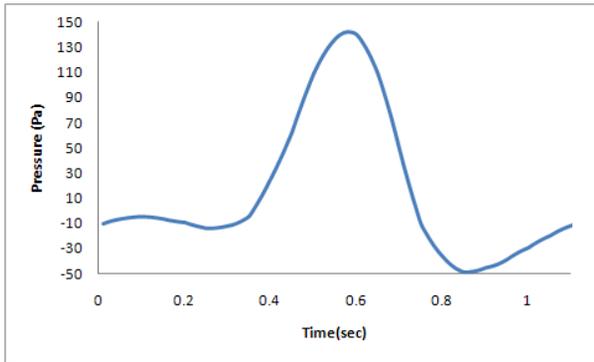


Fig. 5 Pressure inlet profile.

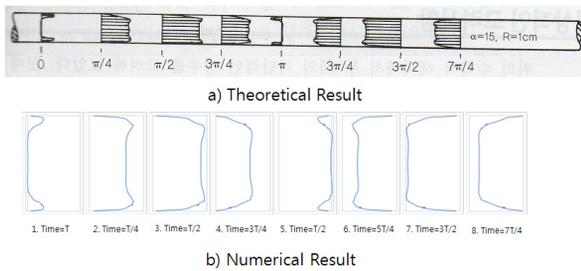


Fig. 6 Comparison of velocity profiles solved by theoretical and numerical method.

이때, P_b , β 는 각각 부력 효과 및 열팽창 계수이며, 다른 계수인 C_{1e} , C_{2e} , C_{μ} , σ_k , σ_ϵ 는 각각 1.44, 1.92, 0.09, 1.0, 1.3의 값을 갖는다. 한편 유동의 물성치는 밀도는 1050kg/m^3 로 하였다.

2.3 격자 및 경계조건

격자 조건은 로봇 형상에 따라 달라지나, 분지관 모델에 비해 로봇 모델의 사이즈는 상대적으로 작으므로, 대략 10만 개의 격자수를 유지하였다. 이때 분지부에서 격자 형상을 Fig. 3에 도시하였다.

맥동류 유동의 모사를 위해 입구는 먼저 Fig. 5와 같은 형태 압력 조건을 주었다. 이는 네거티브 플로우를 포함한 대퇴 동맥의 압력 파형[5]을 모사한 것이다. 두 개의 출구는 각각 계기압력 0으로서 정압 조건을 부여하였으며, 관 벽과 내부 물체 벽에는 노 슬립 조건을 적용하였다. 전체 경계조건을 Fig. 4에 도시하였다.

3. 본 론

3.1 전산해석 타당성 검증

본 해석에 들어가기에 앞서, 해석의 타당성 검증을 선행하



Fig. 7 Drag comparison graph with frontal shape.

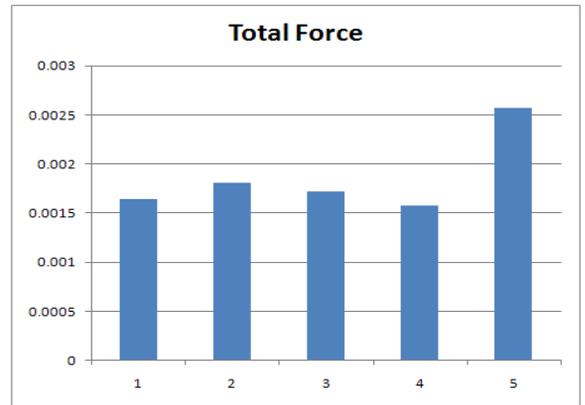


Fig. 8 Drag comparison graph with rear shape.

였다. 맥동류 내부 물체의 항력 계산에 관한 연구이므로 주제를 둘로 나누어, 먼저 이론적인 맥동류[6]와 전산해석의 결과가 타당하게 일치하는지를 확인하였고, 내부 물체 항력에 대한 기존 논문 결과와 전산해석의 결과가 일치하는지를 확인하였다.

강체 벽, 비정상 유동 해석에서 혈관의 단면적이 일정하다고 가정하면, Navier-Stokes 방정식을 나타내는 식 (2)는 원통 좌표계에서 다음과 같이 다시 쓸 수 있다

$$\rho \left[\frac{\partial u_z}{\partial t} \right] = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right] \quad (6)$$

압력 구배가 오로지 시간에 따라서만 변하고, 식 (7)과 같이 사인파형태로만 나타난다면, 그 해는 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

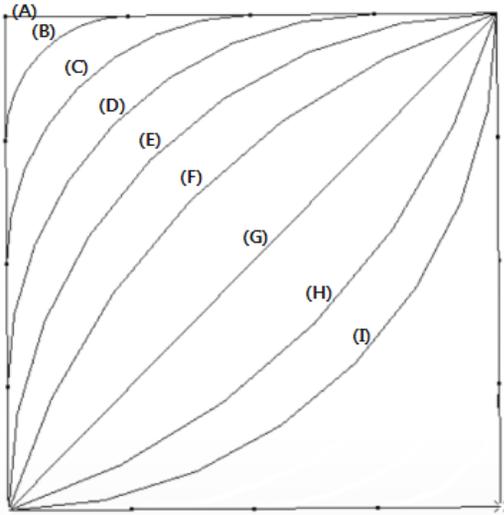


Fig. 9 Shape specification for the drag comparison.

$$\frac{\partial p}{\partial z} = f(t) = -K e^{i\omega t} = -K(\cos\omega t + i \sin\omega t) \quad (7)$$

$$u(r,t) = \frac{K}{i\omega\rho} \left[1 - \frac{J_0\left(a\sqrt{\frac{\omega}{\nu}} i^{3/2}\right)}{J_0\left(r\sqrt{\frac{\omega}{\nu}} i^{3/2}\right)} \right] e^{i\omega t} \quad (8)$$

여기서 K는 유동에 따라 정해지는 상수이며, J_0 는 0순위 1차 Bessel function(Bessel function of the first kind of the zero order)이다. 또한 ω , ρ , a , ν 는 각각 유동의 맥동 각속도, 밀도, 관 직경, 동점성 계수를 나타낸다. 이때, 다음과 같이 정

의되는 Womersley 수에 따라 맥동류의 시간에 따른 양상은 매우 다르게 나타나므로, 각각 다른 유동 조건에 대하여, 해석을 실행한 뒤 식 (8)의 이론해와 비교하였다.

$$\alpha = a\sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (9)$$

Womersley 수와 관 직경을 바꿔가면서 각 주기의 상(time phase)에 따라 속도 프로필을 비교하였고, 그 결과를 각각 그림 6에 도시하였다. 상이 진행하면서 생기는 약간의 오차는 전산해석 결과에서 정확한 비교 시작점을 찾는 데서 생긴 오차가 누적되어 나타난 것으로 예측된다. 그러나 전반적으로 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 이 결과를 바탕으로 신뢰성을 확보했다고 판단, 다음 단계의 해석으로 진행하였다.

3.2 부분적 형상 변화에 따른 항력 변화

그림 2와 같은 형상이 각각 국부적으로 전면부와 후면부로 달라질 때, 정상상태 해석에서 전체 항력을 비교한 결과를 각각 그림 8, 9에 도시하였다. 이 결과를 통해 구면과 이와 유사한 형태인 네 번째 모델이 가장 항력이 작게 나옴을 알 수 있었다. 그러나 이 두 모델의 항력이 비슷한 값을 가지므로, 구형 모델과 근접한 모델에 대해서 좀 더 자세히 항력 계산을 해볼 필요가 있다.

3.3 구면 형상과의 맥동류에서 항력 비교

그림 9에서 (E) 타입으로 표시한 형태가 구형 형상이며, (A), (G) 타입은 각각 원통 실린더와 원뿔 형태에 해당한다.

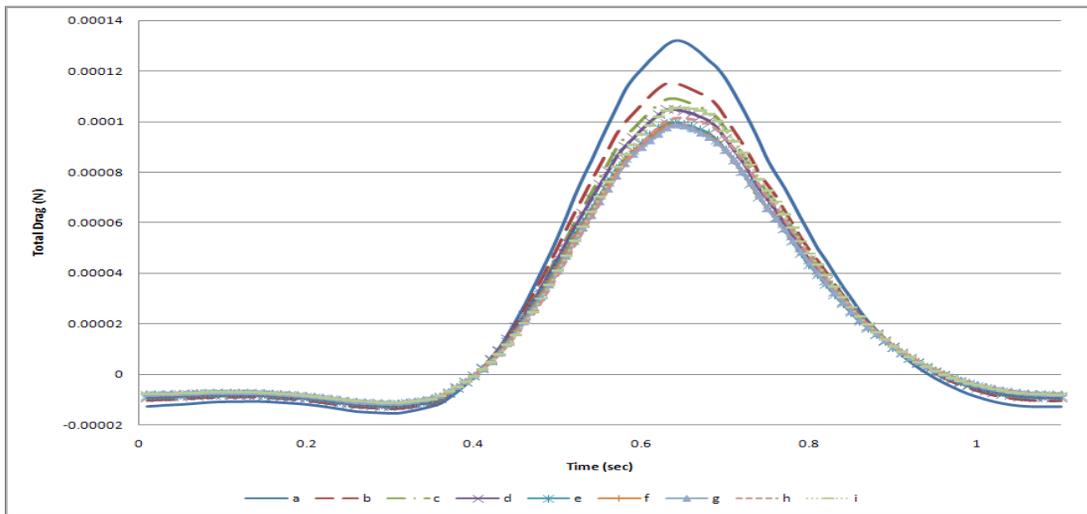


Fig. 10 Total drag profile with various frontal body shape.

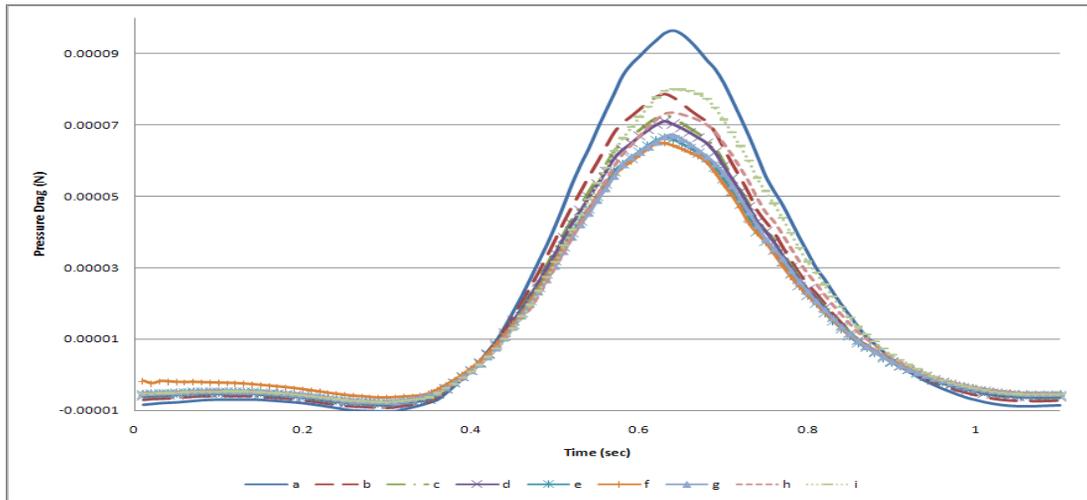


Fig. 11 Pressure drag profile with various frontal body shape.

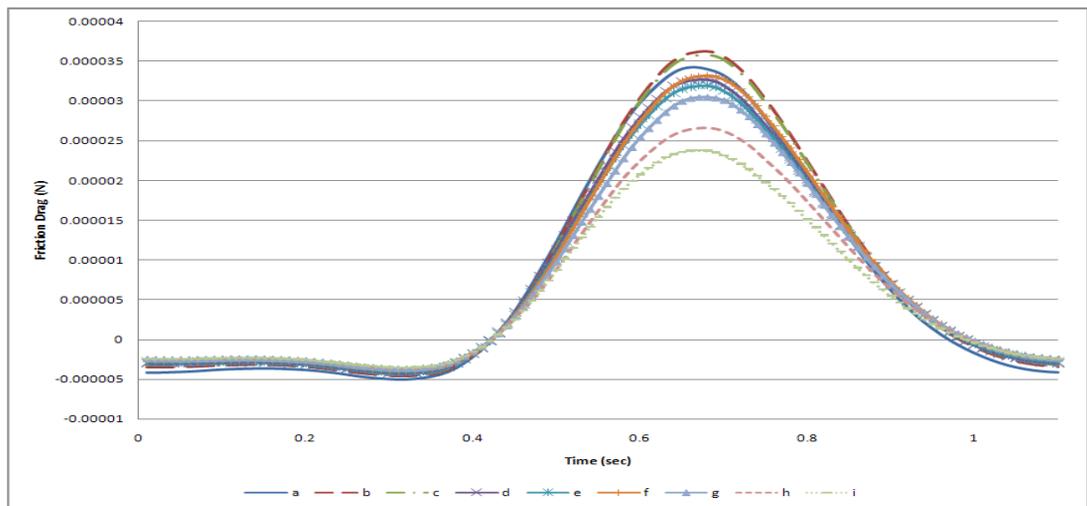


Fig. 12 Friction drag profile with various frontal body shape.

각 형상에 대하여, Fig. 5와 같은 맥동류 형태의 파형에 대한 항력 계산을 실시하였다.

항력 계산은 마찰 항력과 압력 항력으로 나누어 계산하였으며, 성분별로 계산한 뒤, 벡터 합으로 전체 크기를 정하였다. 방향은 유동 방향에 대한 힘의 성분을 기준으로 하였다 또한 맥동류 해석이므로, 10주기를 해석하여 마지막 주기에서는 이전 주기와 값의 변동이 1% 이내로 거의 없으므로, 이때 값을 데이터로 이용하였다 전체항력과 그 성분인 압력, 마찰 항력을 도시한 결과를 Fig. 10,11,12에 각각 도시하였다.

Fig. 11에서 압력 항력은 구형에 가까울수록 작은 값을 띠며, 특히 구형과 형상 (F), (G)는 그 차이가 미소하게 작게 나타났다. 오히려 최소값은 형상 (F)에서 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 12에서 마찰 항력은 뿔에 가까운 형태일수록 작은 값을 갖게 된다. 이는 형상 전면부에서 속도 변화가 부드럽게 일어날수록 이에 기인한 전단력이 작게 작용하기 때문으로 해석된다. 두 결과를 종합해보면, 압력 항력이 마찰항력에 비해 약 2배 정도 더 큰값을 갖게 되므로, 구형 형상에 가까울수록 전체 항력의 크기도 감소한다. 그러나 구형이 반드시 가장 작은 항력을 가지는 것은 아니며, 오히려 구형보다 곡률 반경이 좀 더 큰 값을 갖고, 중심부가 약간 뾰족한 형태를 띠는 형상이 좀 더 작은 항력을 가지는 것을 알 수 있다

한편, 맥동류에 기인한 변화는 상대적으로 저항력의 경우에는 항력의 차이가 미미하며, 항력이 큰 경우가 문제가 됨을 알 수 있다.



이상에서 항력의 크기는 전체적으로 구면 형상일 경우에 작게 나타나나, 전반적으로 구형에 가까울 경우 그 항력의 크기는 매우 유사함을 확인하였다. 그러나 반드시 구면 형상이 최소의 항력을 가진다고 볼 수 없다. 오히려 좀더 뾰족한 형상에서 최소의 값을 갖는 것을 확인하였다. 최소 항력을 갖는 정확한 형상에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다. 그러나 혈관 로봇이 초소형 로봇이라는 것을 감안하면, 혈관 치료를 위한 다양한 기능의 탑재를 위해서 최대한의 최적을 갖도록 해야 하므로, 로봇의 실제적인 형상 디자인을 위해서는 항력뿐만 아니라, 기능성까지 고려되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 이상화된 분지관에서 맥동류를 해석하고, 형상이 다른 내부 물체의 항력이 어떻게 달라지는지 그 경향을 비교하였다. 본 연구가 실제 로봇 설계에 바로 적용될 수는 없으나, 이상적인 형상에 대한 몇 가지 결론은 내릴 수 있을 것이다.

- 1) 이론적인 맥동류 계산 결과를 바탕으로, 맥동류에서 항력 변화 예측에 대한 전산해석의 신뢰성을 검토하였다.
- 2) 전면 형상과 후면 형상의 변화에 대한 정상 해석을 통해 전면의 영향이 보다 큼을 확인하였고, 구면에 가까운 형태에서 최소 항력을 가짐을 예측하였다.
- 3) 원형 실린더에서 원뿔까지 곡률 반경을 바꿔가면서, 맥동류에서 항력 계산을 비교하였다. 항력의 차이는 주로 최대 항력에서 차이가 나며, 압력 항력은 뿔에 가까울수록, 마찰항력은 구형에 가까울수록 항력이 작아짐을 확인하였다.

- 4) 전반적으로 구형에 가까울수록 항력이 작아지나, 로봇의 디자인을 위해서는 기능성까지 고려하여 최적의 형상을 도출할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술개발사업 (과제번호: 10030037)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2007, 안상준, 김용대, 맹주성, 한철희, “초소형 의공학용 유영로봇을 위한 플래핑 평판들의 추력 발생 연구,” 대한대한기계학회 2007년도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp.1894-1899.
- [2] 2006, 임진완, 박현준, 김병규, “하나의 공압라인을 이용 자벌레 이동방식을 모사한 초소형 관 탐사 로봇,” 대한기계학회 2006년도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp.1-6.
- [3] 1989, Yang W.J, *Biothermal Fluid Sciences, Principles and Applications*, Hemisphere.
- [4] 1997, Fung, Y.C., *Biomechanics Circulation, 2nd Ed.*, Springer, pp.118-123.
- [5] 2008, Zhang, J., Chua, L.P., Ghista, D.N., Zhou, T.M. and Tan, Y.S., "Validation of numerical simulation with PIV measurements for two anastomosis models," *Medical Engineering & Physics*, Vol.30, pp.226-247.
- [6] 2006, 조영일 외 5인, *생체유체역학*, 야스미디어, pp.178-185.