

유한한 벽 두께를 가지는 3 차원 Collapsible vessel 내의 유동에 대한 수치적 연구

성현찬* · 심은보** · 고희종** · 김경훈**

1. 연구배경

인체내의 대부분의 유체를 운반하는 vessel(정맥, 동맥, 폐순환 그리고 기도 등)은 탄성체이며 transmural 압력(내외부의 압력차)이 임계값 이하로 될 때 붕괴(collapse)할 수 있다. Collapsible 관에 대한 이전의 연구들은 다음과 같은 범주로 나눌 수 있다. 첫번째는 Lumped-parameter 또는 1 차원 유동 모델(예를 들면, Elad & Kamm, 1989)은 transmural 압력을 국소 단면적에 관련지우는 관 법칙(tube law)을 사용하여 이러한 관의 거동에 대한 기본적인 이해를 제공하였다. 둘째로는 2 차원 유동 모델(예를 들면, Luo & Pedley, 2000)은 Navier-Stokes 방정식을 해석함으로써 붕괴 채널에서의 정상 및 비정상 유동을 조사하였다. 이들 모델은 관 법칙의 사용을 배제하고 collapsible 벽을 두께가 없는 얇은 탄성막으로 하였다. 마지막으로 지금까지 단지 하나의 3 차원 모델(Heil, 1997)에 대한 해석만이 이루어져 있다. 그러나 이 모델은 Stokes 유동 영역으로 국한되었고 collapsible 벽을 근사화 하기 위하여 얇은 쉘 이론이 사용되었다. 따라서 본 논문에서는 기존 연구의 한계를 극복하고자 관 벽이 유한한 두께를 가지는 실질적인 비정상 3 차원 collapsible tube 의 수치적 모델을 개발하고 관내의 유동을 해석하여 속도 분포와 유동 한계 같은 특성을 파악하고자 한다.

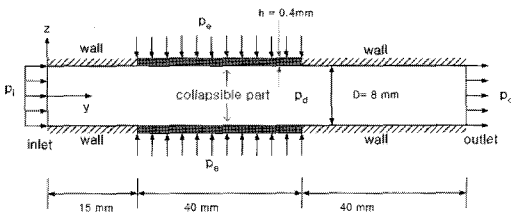


Fig. 1 Schematics of geometry and loading

2. 수치적 모델

본 논문에서 사용된 3 차원 모델로서 두 강관

사이에 연결된 collapsible tube 의 개략도를 Fig. 1 에 보여주고 있다. 관 벽의 collapse 를 유발하기 위하여 관 벽에 원주 방향의 작은 압력섭동을 부과 하였다. 입구 압력은 0 이며, 출구 표면에서의 수직 응력은 선형적으로 0 에서부터 -4kPa 까지 감소 후 일정하게 유지된다. 본 모델과 같은 유체-고체 상호작용 문제를 해석하기 위하여 유한요소법에 기반을 둔 ADINA 코드를 이용하였다. 수치해석에 사용된 유체의 물성치는 점성, 비압축성 뉴턴 유체로 가정하였으며, 밀도와 점성계수는 각각 1000kg/m^3 , 0.01kg/ms 이다. 고체는 latex 고무의 물성치($E=6.07\text{MPa}$, 밀도는 1000kg/m^3 , 포와송비는 0.49)를 이용하였다. 또한 유체와 고체를 해석하기 위하여 사용된 격자 수는 각각 13,095 개와 15,204 개의 격자가 사용되었으며 Fig. 2 에서 보여 주고 있다.

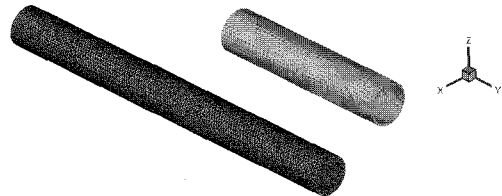


Fig. 2 Surface mesh of the model for fluid and solid

3. 계산 결과 및 검토

그림 3 은 collapsible vessel 이 최대로 변형되었을 때의 모양을 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 최대 변형 영역은 관의 하류 끝 부근에서 나타나며, 관의 형상은 3 개의 호(lob)의 모양으로 이루어져 있으며, 이는 Heil 의 3 차원 정상상태 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 4 는 무차원 최대 반경방향 변위를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 시간이 약 0.4 초 부근에서 갑작스런 변위 증가를 알 수 있으며 이는 그림 3 에서와 같이 관의 collapse 와 관련이 있다.

그림 5 는 시간의 함수로 체적 유량(사각형)과 하류 transmural 압력 변화(원)를 도시한 것이다. 체적유량은 최대 변형이 일어나는 곳에서 최대의 값을 나타내며 이후엔 갑작스런 감소가 일어난다. 또한 가장 낮은 -4kPa 의 압력에서는 거의 변화가

* 금오공과대학교 대학원 기계공학과

** 금오공과대학교 기계공학부

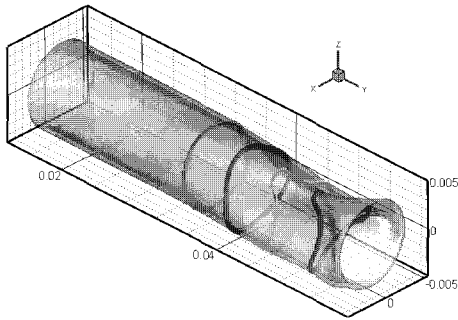


Fig. 3 Maximum collapsed vessel shape at the different y -direction position

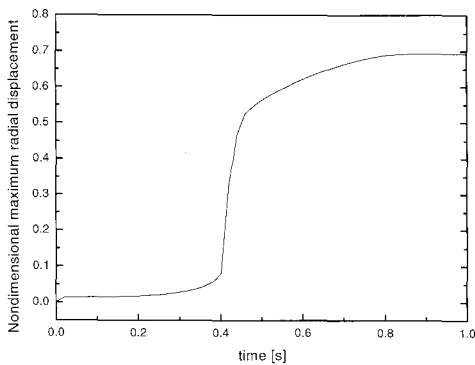


Fig. 4 Nondimensional maximum radial displacement as a function of time

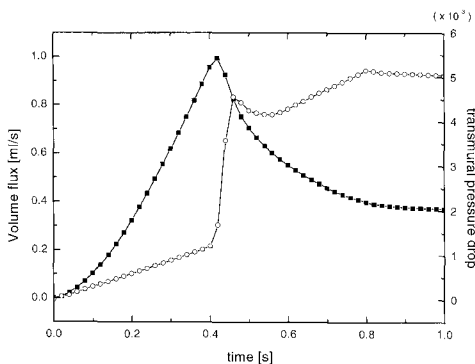


Fig. 5 Volume flux and downstream transmural pressure change as a function of time

없음을 알 수 있다. 하류 transmural 압력은 초기에는 서서히 증가하다가 최대 유량이 발생하는 곳에서 하류의 압력이 크게 감소하여 압력차가 급격히 커짐을 알 수 있다.

그림 6은 시간 $t=1$ 초 일 때 유동방향의 위치에

대하여 2 차 유동에 대한 유선을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 축 방향(y 방향)에 수직인 절단면에서 2 차 유동이 발생함을 알 수 있으며 vessel의 중심부근으로 향하고 있음을 알 수 있다.

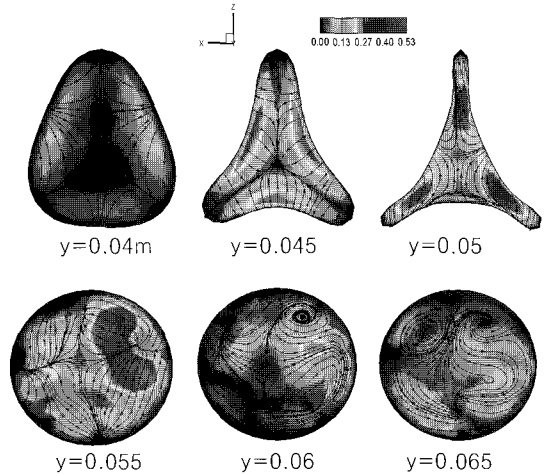


Fig. 6 Contourplots of secondary flow streamlines, superimposed with secondary velocity magnitudes, at various locations along the flow ($t=1.0s$)

4. 결 론

본 연구에서 관 벽이 유한한 두께를 가지는 실질적인 비정상 3차원 collapsible tube에 대하여 수치 해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

하류 끝 부근에서 3 개의 호(lob)로 이루어진 모양으로 collapse가 일어남을 관찰하였으며, 이는 이전의 연구 결과와 일관성이 있음을 알 수 있었다.

collapsible vessel의 변형 형상은 유동 특성에 큰 영향을 미치는 것을 관찰하였다.

참고 문헌

- (1) Elad D and Kamm R.D., 1989, "Parametric evaluation of forced expiration using a numerical method," *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol.111(3), pp. 192-199.
- (2) Luo X.Y. and Pedley T.J., 2000, "Multiple solutions and flow limitation in collapsible channel flows," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.420, pp.301-324.
- (3) Heil M., 1997, "Stokes flow in collapsible tubes - Computation and experiment," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.353, pp.285-312.