

CFD 해석을 이용한 박동형 막 산화기 설계를 위한 구조적 해석

Structure Analysis for Design a Pulse Type Membrane Oxygenator using CFD Analysis

*# 박영란¹, 홍철은², 강형섭^{3,6,7}, 김진상^{3,7}, 김민호⁴, 김성종⁵, 김기범^{3,6,7}

*#Young-Ran Park(younggran@jbnu.ac.kr)¹, Chul-Un Hong², Hyung-Sub Kang^{3,6,7}, Jin-Shang Kim^{3,7}, Min-Ho Kim⁴, Seong-Jong kim⁵, Gi-Beum Kim^{3,6,7}

¹ 전북대학교 대학원 화학공학과, ² 전북대학교 공과대학 바이오메디컬공학부, ³ 전북대학교 수의과대학 약리독성학교실, ⁴ 전북대학교 의학전문대학원 흉부외과학교실, ⁵ 전북대학교 공과대학 화학공학부, ⁶ 전북대학교 헬스케어사업단, ⁷ 전북대학교 인수공통전염병 연구소

Key words : CFD, FEM, Membrane oxygenator, Balloon pulsation, ECMO

1. 서론

급성호흡부전증(ARDS) 환자의 치료방법은 체외 순환형 막 산화기(Extracorporeal Membrane Oxygenation, ECMO)를 사용하는 것이다. 체외 순환형 막 산화기는 심장수술을 하는 동안 환자의 혈액순환과 혈액에 산소를 공급하는 장치이다[1-2]. 막 산화기에 관한 기존의 연구는 크게 2가지로 구분된다. 체외 순환형 막 산화기(ECMO)는 수술 과정이 복잡하고 혈액펌프를 사용하므로 혈액 손상에 대한 문제점이 있다. 상대정맥과 하대정맥에 중공사막을 삽입하여 장치를 단순화한 혈관 내 폐 보조 장치가 있으나 혈관 내 폐 보조 장치는 단순하고 수술과정이 복잡하지 않지만 가스교환율이 낮은 단점이 있다[3]. 최근 이러한 단점을 보완하기 위하여 국내에서 actuator에 의한 진동기법을 이용한 진동형 혈관 내 폐 보조 장치 개발에 관한 연구가 진행되고 있다[4].

본 연구에서는 혈액 펌프를 사용하지 않고 기구(ballon)를 사용하여 혈액 흐름을 유발시켜 흐름을 원활히 할 수 있는 박동형 막 산화기를 설계하기 위한 막 산화기 모형 내에서의 혈류의 흐름 패턴을 분석하고자 하였다. 이를 위하여 유한요소법(Finite Element Method, FEM)과 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 적용하였다.

2. 박동형 막 산화기의 구조적 설계

막 산화기 주위를 기구를 사용하여 혈액의 손상을 최소화시키고, 한 방향에 대한 혈액의 자연흐름을 유발시키기 위하여 박동형 막 산화기에 대한 구조적 설계 작업을 수행하였다. 기구의 수축과 이완에 따른 튜브의 변형과 혈액의 유동을 분석하기 위하여 전산유체역학(CFD) 프로그램인 ADINA 소프트웨어(ADINA R&D, Inc)를 사용하여 구조모델과 혈액에 해당하는 유체모델에 대하여 유한요소기법을 적용하여 모델링을 하였다.

Fig. 1은 박동형 막 산화기에 대한 초기 모델을 나타내었다. 초기 구조모델에서 튜브의 내경은 30 mm, 두께는 2 mm, 길이는 19mm로 설정하였으며, 튜브는 3부분으로 나뉘어 ① → ② → ③ 순서로 각 부분이 기구에 의해 수축되도록 적용하여 Inlet방향에서 Outlet방향으로 혈액의 흐름이 유발되도록 설정하였다. 구조에 해당하는 튜브에 적용된 물성 값은 다음과 같다. Young's Modulus는 5.0×10^6 N/mm², Poisson's ratio는 0.45, Density는 4.0×10^3 kg/mm³ Pressure Magnitude는 5.0×10^4 N/mm² 이다.

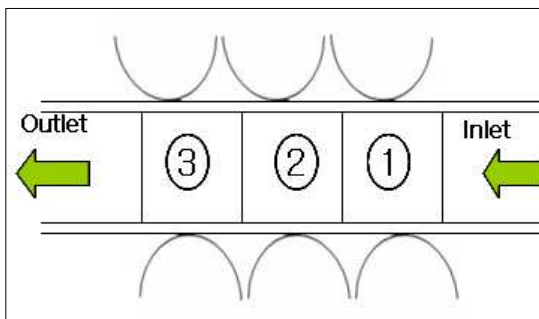


Fig. 1 Initial model of balloon type ECMO

박동형 막 산화기 모형안에서의 한 방향에 대한 혈류의 자연흐름을 발생시키기 위해서는 3부분으로 구분되어진 튜브에 각각 시간차를 두고 압력하중이 가해진다. 이때 기구가 주기적으로 수축/이완하여 혈액의 흐름이 발생한다. 기구에 의한 튜브의 수축/이완현상을 나타내기 위해서 튜브에 가해지는 시간에 따라 변화하는 압력하중 값은 Pressure Magnitude값과 Time Function Value값을 곱한 값을 적용하였고, Time Function Value값은 Sine 반주기와 Sine 주기를 각각 계산 후 적용하였다. Balloon에 의해 반복적으로 수축/이완되는 튜브의 한 주기는 사람의 맥박수를 고려하여 1 sec가 되도록 설정하였고, 튜브의 각 구간이 압력하중을 받는 시간차는 0.1 sec로 설정하였다.

3. CFD 해석

Fig. 2는 유한요소로 이루어진 박동형 막 산화기의 흐름모형을 나타내었다. 튜브에 해당하는 구조모델은 시간에 따른 하중에 대한 튜브의 변형을 모사하기 위하여 Dynamics- Implicit Type으로 설정, 혈액에 해당하는 유체모델은 시간에 따른 유동상태를 분석하기 위하여 Transient Type과 유체는 튜브의 변형에 의해 압축성을 나타내는 Slightly Compressible Type으로 설정하여 유체-구조 연성해석(FSI)을 하였다. 한 방향에 대한 혈류의 흐름여부는 흐름 모형의 Inlet과 Outlet에서의 유체의 유속(velocity)과 정압(static pressure)을 측정 후 분석하였다. 시간에 따라 변화하는 하중 값(Time Function Value)을 Sine 반주기와 Sine 주기를 계산하여 시뮬레이션을 수행하였다. 두 모델을 비교하여 분석한 결과 Sine 반주기일 때보다 Sine주기로 값을 설정하였을 때 더 자연스러운 혈액의 자연흐름이 발생하는 것을 확인하였다.

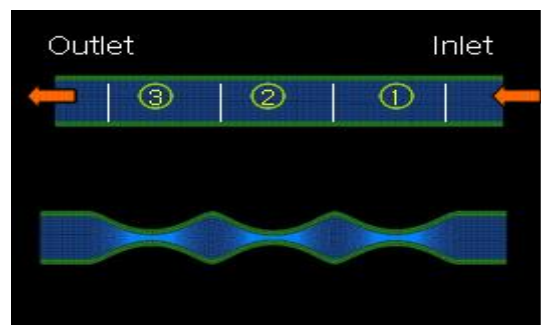


Fig. 2 Finite elements of balloon type ECMO

Fig. 3 - Fig. 6에는 Time Function Value값을 Sine 반주기로 계산하여 해석한 결과이다. 해석결과 흐름모형에서의 유체의 유동특성에서는 혈류의 흐름이 나타나는 것을 확인할 수 있었으나, 튜브가 수축하였을 때보다 이완될 때 Outlet 방향보다 Inlet 방향에서 유체의 흐름속도와 정압이 크게 나타났기 때문에 역류 현상이 발생한다고 판단 할 수 있다. 이는 Time Function Value값이 Sine 반주기인 경우, 매우 큰 가속도로 튜브가 이완되기 때문에 진행방향(Inlet방향 → Outlet방향)에서는 튜브가 수축되어 있는 구간보다 이완되어 있는 구간으로 유체가 흘러들어 올 수 있기 때문이다.

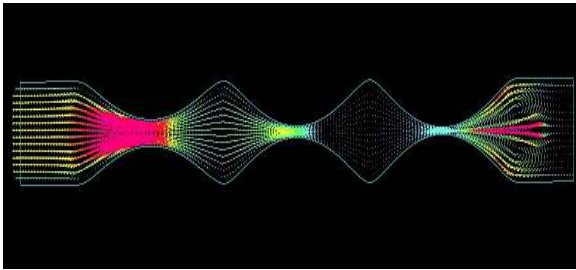


Fig. 3 Velocity in half cycle of sine

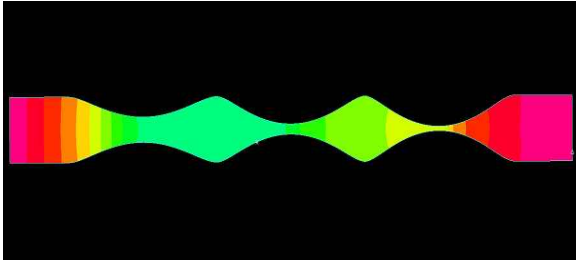


Fig. 4 Pressure distribution in half cycle of sine

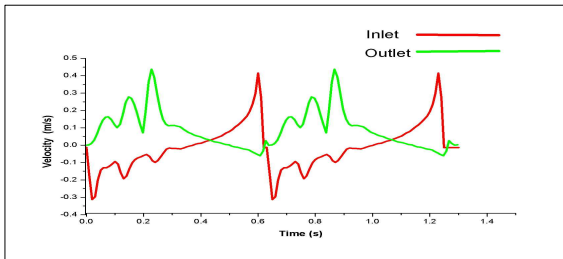


Fig. 5 Velocity Graph in half cycle of sine

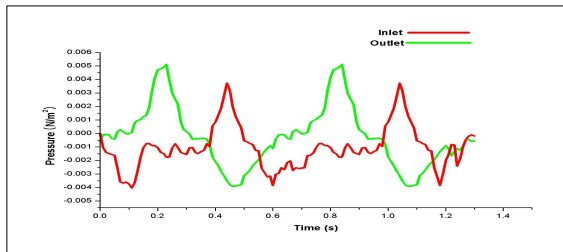


Fig. 6 Pressure distribution Graph in half cycle of sine

Fig. 7 - Fig. 10은 Time Function Value값을 Sine 주기로 계산하여 해석한 결과이다. 유체가 Outlet방향에서 나와 다시 Inlet방향으로 흘러들어가 혈류가 순환되도록 모형화 하기위해 인공심폐기모형의 초기모델보다 튜브의 길이를 연장하였고, 튜브의 구간을 더 세분화하였다. 해석결과 시간에 따라 변화하는 하중 값이 Sine 주기일 경우 역류현상이 감소하는 것을 확인하였다. Inlet방향에서는 유체의 흐름속도와 정압이 음의 값이 나타났고 Outlet방향에서는 양의 값이 나타났다. 따라서 혈액의 자연흐름을 유발하고 한 방향에 대한 혈류의 흐름이 발생했다고 판단할 수 있다.

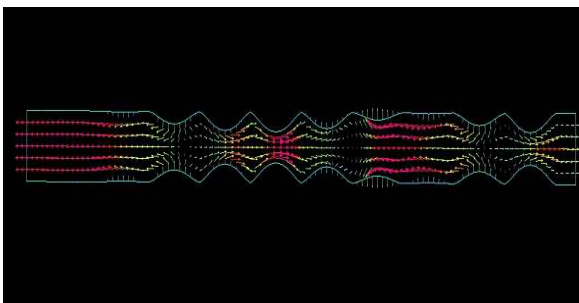


Fig. 7 Velocity in cycle of sine

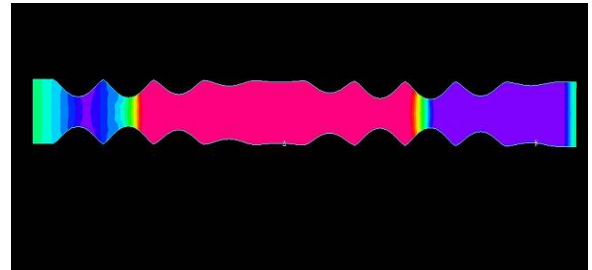


Fig. 8 Pressure distribution in cycle of sine

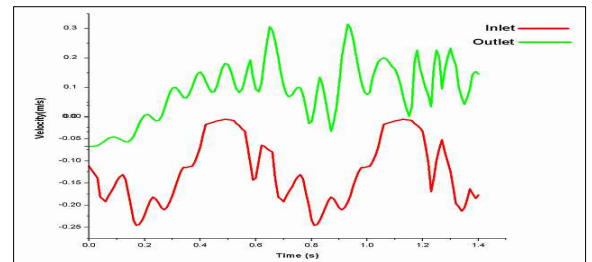


Fig. 9 Velocity Graph in cycle of sine

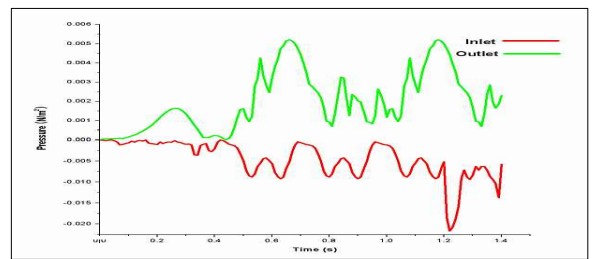


Fig. 10 Pressure distribution Graph in cycle of sine

4. 결론

본 연구에서는 기구(balloon)의 수축/이완에 따른 박동형 막 산화기 내에서의 혈류의 유동 특성 해석을 수행하였다. CFD 시뮬레이션을 통해 구조-유체 연성해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 압력주기(Sine 반주기/Sine 주기)에 따른 혈류의 유동특성은 다르게 나타났으며, 압력주기가 Sine주기일 때 한 방향에 대한 혈류의 자연흐름이 발생하는 것을 확인하였다. 적절한 압력주기는 수치해석을 통하여 분석함으로써 도출해 낼 수 있으며, 원하는 혈관 내 흐름속도를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. CFD 시뮬레이션은 혈류의 흐름특성을 미리 예측할 수 있기 때문에 막 산화기 설계에 있어서 적용가능한 해석방법이라 할 수 있다.

참고문헌

1. Bartlett, RH, Roloff, DW, Cornell, RG, Andrews, AF and Dillon, PW, "Extracorporeal circulation in neonatal respiratory failure: a prospective randomised study," *Pediatrics*, 4, 479-487, 1985
2. Juntao, Z, Timothy, D, Tao, Z and Bartley, PG, "Characterization of membrane blood oxygenation devices using computation fluid dynamics," *Journal of Membrane Science*, 288, 268-279, 2007.
3. Vaslef, SN, Cook, KE, Leonard, RJ, Mockros, LF and Anderson, RW, "Design and evaluation of a new, low pressure loss, implantable artificial lung," *ASAIO J*, 40, 522, 1994
4. 김기범, 김중석, 김중수, 유일수, 이왕로, 김성중, "중공사막에서의 물질전달 특성에 관한 연구," *Membrane J*, 14, 142-148, 2004