

이중 박동형 생명구조장치의 혈류 및 박동성에 대한 분석

최성욱*, 이정찬**, 민병구***

Analysis on Blood Flow and Pulsatility of the Dual Pulsatile Extracorporeal Life Support

1. 서론

본 연구는 급성 심부전 또는 심정지 등의 응급 상황에서 환자의 체내에 혈류를 순환시켜 혈압을 유지하고 산소를 공급해주는 이중박동형 생명구조장치(dual pulsatile Extracorporeal Life Support, dual pulsatile-ECLS)의 개발과 개발된 시스템의 성능평가에 있어서 가장 중요한 두 가지 변수인 공급 가능한 혈액의 박출량과 공급혈류의 박동성 분석에 대한 것이다. 이 논문에서 박동성 혈류는 평균 유속과 평균 혈압의 곱으로 표현되는 연속혈류의 유체에너지 보다 9% 높은 에너지를 가지는 펄스 형태의 혈류를 의미하는데, 박동혈류의 혈류 역학적 에너지가 연속 혈류에 비해 9% 이상 높을 때, 연속 혈류에 비해 조직에서의 혈류 저항이 작아지고, 같은 평균 압력을 유지함에도 더 많은 혈류를 공급할 수 있음이 이미 발표된바 있으나, 임상 환자에게 적용하기 위한 2 L/min 이상의 혈류를 공급하는 박동형 펌프는 아직 개발된 바 없다 [1-3].

전통적인 박동형 혈액펌프는 왕복운동을 하는 작동기와 혈액주머니 혈류의 방향을 일정하게 해주는 판막으로 구성된다. 기존에 시도되었던 생명구조장치(pulsatile-ECLS)는 주로 하나의 혈액주머니를 이용한 single pulsatile-ECLS로 설명할 수 있다. 이 시스템에서 전체의 작동시간은 혈액주머니로 혈액을 흡입하는 시간인 혈액흡입기와 작동기에 의해 혈액을 박출하는 혈액박출기로 구분된다. 충분한 양의 혈액을 흡입하기 위해 혈액 흡입기를 길게 하면 혈액의 흡입량은 증가하나 반대로 박출 시간이 짧아지고, 박출혈액의 유속이 빨라지는데, 이 때 출력된 혈액의 속도가 막산화기의 적정 최대 속도 (10 L/min) 이상으로 증가함에 따라 혈액 내 전단응력이 크게 발생하고 혈구의 손상 나타난다.

혈류 유입시간을 줄일 경우 혈류유입량을 증가시키기 위해 입력단의 음압을 증가시킬 수 있으나, 음압이 큰 경우 입력 측 카테터 내로 혈관 조직이 흡입 될 수 있고, 정맥혈관이 협착되거나 압력 차로 인한 손상을 유발할 수 있으므로, 펌프 입력 측의 음압이 200 mmHg를 넘지 않도록 해야 한다.

본 연구에서는 single pulsatile-ECLS에서 10 L/min

- * 서울대학교병원 의공학과
- ** 서울대학교 협동과정 의용생체공학과
- *** 서울대학교 의과대학

이상의 높은 박출혈류가 발생하는 것을 피하고, 공급 가능한 혈액량을 높이기 위해 두 개의 single pulsatile-ECLS를 병렬로 연결한 이중박동형 생명구조장치를 제안하였다. Dual pulsatile-ECLS는 한 개의 박동형 펌프를 통해 혈액을 박출하면서 동시에 다른 박동형 펌프를 통해서 혈액을 흡입하기 때문에 박출시간을 길게 하여 혈류 속도를 적절한 범위 내로 유지하면서도 입력 혈류량이 감소되지 않는다.

Single p-ECLS에 대한 체외 실험을 실시하였으며, 이 장치와 동일한 두 개의 박동형 펌프를 가진 dual p-ECLS를 이용하여 동일한 조건에서 실시한 체외 실험의 결과와 비교하였다. 또한 dual p-ECLS에 대한 동물실험을 통해 박동에너지가 충분한 박동혈류를 공급하였는지를 확인한다.

2. 본론

그림 1은 single pulsatile-ECLS가 환자의 대퇴정맥으로 혈액을 흡입하고 막산화기를 거쳐 대퇴동맥으로 혈액을 박출하는 과정과 혈액의 유속에 영향을 미치는 요인을 나타낸 그림이다.

흡입된 혈액의 양은 평균 입력압과 정맥으로부터 single pulsatile-ECLS까지 연결된 catheter와 cannula의 혈류저항에 의해 결정된다. Single pulsatile-ECLS의 입력압과 혈류는 혈액 주머니의 컴플라이언스와 최대 박출량을 알면 식 1,2와 같이 계산될 수 있다.

$$P_{mean, inlet} = (V_{min, sac} R_{inlet} + P_{vein} R_{inlet} C_{compliance, sac}) \left(\frac{e^{\frac{-t'}{R_{inlet} C_{compliance, sac}}} - 1}{T} \right) + P_{vein} \quad (1)$$

$$F_{mean} = (V_{min, sac} + P_{vein} C_{compliance, sac}) \left(\frac{e^{\frac{-t'}{R_{inlet} C_{compliance, sac}}} - 1}{T} \right) \quad (2)$$

체외 모의 순환장치에 single pulsatile ECLS를 이용하여 분당 60회의 박동수로 2 L/min의 혈류를 순환시키고, pulsatile-ECLS의 혈류 흡입력과 박동성을 비교하였다. 실험에서 최대 일박출량이 45 ml인 single pulsatile-ECLS를 이용하였으며, 그림 2와 같은 모의 순환모델을 적용하여 체외 성능평가를 실시하였다.

동맥용 카테터와 정맥용 카테터는 굵기가 15, 17 Fr 인 것을 사용하였으며, 체순환 클램프의 혈류 저항은 50 mmHg min/liter로 조절하였고, 체외 순환기 모델의 평균 혈압은 100 mmHg로 유지하였다. 컴플라이언

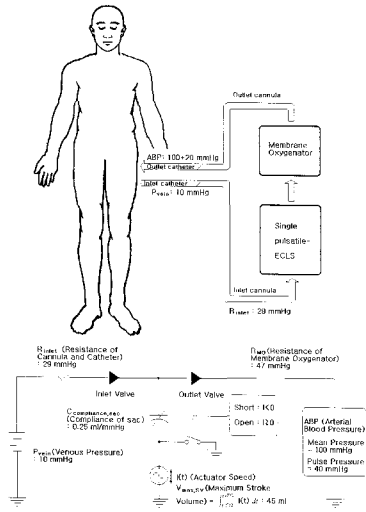


그림 1. single pulsatile-ECLS를 이용한 혈액공급

스는 1.12 ml/mmHg를 유지하였다. 모의 순환장치의 최저 혈압은 80 mmHg 이며, 최고 혈압은 120 mmHg 를 유지하였다. 평균 혈류는 2.0 L/min을 유지하였다.

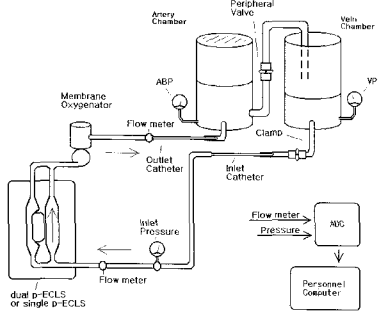


그림 2. 체외 모의순환장치를 이용한 실험

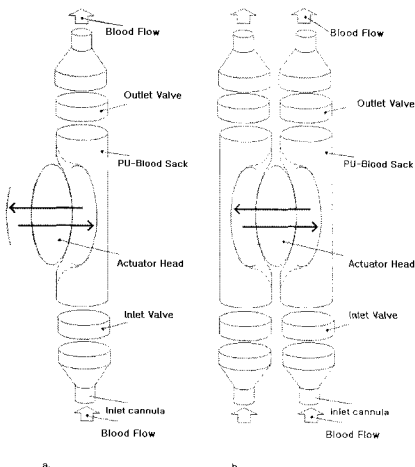


그림 3 single p-ECLS와 dual p-ECLS의 박동형펌프의 구조

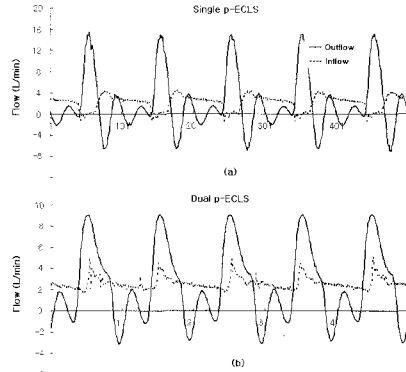


그림 4. single p-ECLS와 dual p-ECLS의 출력 혈류와 입력 혈류

Dual pulsatile ECLS는 그림 3의 b와 같은 구조를 가진 것으로 한다. 각각의 펌프를 분당 30회의 박동수로 박출하였으며, 2 L/min의 혈류를 유지하기 위해 입력측의 혈류저항을 조절하였다. 다른 모든 조건은 single pulsatile ECLS를 실험한 조건과 같게 하였다. 7마리의 돼지를 이용하여 동물실험을 실시하고, 동물 실험의 결과로부터 혈액의 박동에 의한 에너지 비율을 나타내는 Energy Equivalent Pressure Increment (EEP inc.)를 계산하였다[3].

3. 결론

체의 실험을 통해 dual pulsatile-ECLS는 single pulsatile-ECLS와 달리 2 L/min 이상의 혈류를 공급하고, 최저 입력압이 -200 mmHg 이하로 내려가지 않았음에도 막산화기를 통과하는 최고 유속을 10 L/min 이하로 낮추었음을 확인할 수 있었다. 동물실험에서 dual pulsatile-ECLS는 2 L/min 이상의 혈류를 공급하여 동맥압을 정상 수준으로 유지할 수 있었으며, 동맥의 EEP inc.를 10±2%로 유지하였다.

참고 문헌

- (1) Ündar A, Masai T, Yang SQ, et al. Pulsatile Perfusion Improves Regional Myocardial Blood Flow during and after Hypothermic Cardiopulmonary Bypass in a Neonatal Piglet Model. ASAIO J 2002 ; 48: 90-95
- (2) Ündar A, Masai T, Frazier OH, Frazier CD. Pulsatile and Nonpulsatile Flows Can Be Quantified in Terms of Energy Equivalent Pressure During Cardiopulmonary Bypass for Direct Comparisons. ASAIO J 1999 ; 45: 610-614
- (3) Ündar A, Frazier OH, Frazier CD. Defining Pulsatile Perfusion: Quantification in Terms of Energy Equivalent Pressure. Artif Organs 1999;23:8 712-716