

Atriopulmonary bypass 수술 후 환자의 혈류역학적 변화에 대한 수치적 연구

심은보* · 고흥종* · 선 경**

1. 연구배경

삼첨판 폐쇄증(tricuspid atresia), 우심장 형성부전(hypoplastic right heart) 등과 같은 질병에서는 우측의 심실이 제 역할을 하지 못하며, 오히려 전체 심혈관 순환을 저해하는 요인으로 떠오르게 된다. 이와 같은 환자의 경우 우심실로 혈액을 흐르지 못하도록 하는 우심실 우회수술이 일반적으로 행하여지고 있다.⁽¹⁾ 이와 같은 우회 수술에는 Vena Cava에서 우심방과 우심실 모두를 우회하여 폐동맥으로 연결하는 cavopulmonary 방식과 우심실만을 우회하는 atriopulmonary 방식이 있다(Fig. 1). 이와 같은 우심실 우회수술 환자의 혈류역학적 상태에 대한 수많은 임상적 보고들이 있어 왔지만 아직 이론적 연구는 매우 부족한 실정이다. 비록 연결관 내의 혈류에 대한 유체역학적 연구는 비교적 많이 이루어졌지만, 심혈관계의 생리학적 변화에 대한 거시적 분석은 거의 이루어지지 못한 상태이다.

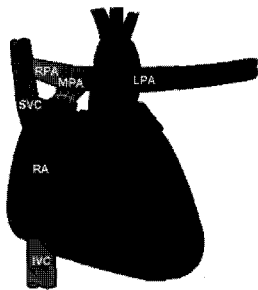


Fig. 1 Schematic of atriopulmonary type bypass surgery

따라서 본 연구에서는 atriopulmonary 방식의 우심실 우회수술 후 환자의 혈류역학적 상태 분석을 위한 수치적 방법을 제시한다. 이를 위하여 lumped parameter 방법을 사용한 혈류역학적 모델을 구성하였으며, 여기에는 순환계의 단기적 자율조절기능에 대한 근사적 모델링이 포함되어 있다.

2. 수치적 방법

우심실 우회수술 후 환자의 혈류역학적 상태를 분석하기 위하여 전체 심혈관계를 다음 Fig. 2와 같이 6개의 전기회로 요소로 나누었다. 전기 회로도 상의 전기저항은 혈관내의 유동저항을 의미하며, 혈관 및 심장의 compliance는 capacitance에 해당한다. 구성된 회로에 Kirchhoff 법칙을 적용하면 회로의 각 요소에서의 혈압에 대한 상미분 방정식을 유도할 수 있다.⁽²⁾ 여기에서 사용된 심혈관계 자율조절 기능은 주로 단기적 조절기능으로서 baroreflex system 과 cardiopulmonary system 의 두 가지로 구성된다.

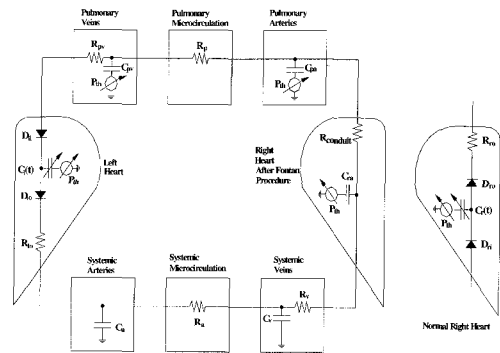


Fig. 2 Schematics of lumped parameter model of cardiovascular system after bypass surgery

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

먼저 본 연구에서 구현한 수치적 방법의 타당성을 검증하기 위하여 atriopulmonary 방식의 우심실 우회수술 전후 환자의 혈류역학적 상태 변화 계산 결과를 Kelly 등⁽³⁾에 의해 제시된 임상데이터와 비교하였다(Fig. 3). 수술 후 환자의 수축기 혈압은 감소하고, 이완기 혈압은 증가한다. 그러나 평균 혈압은 거의 일정한 수준을 유지한다. 반면 수술 후 우심실 기능의 부재로 인하여 정맥쪽 압력은 큰 폭으로 상승한다. 여기에서 계산결과는 대부분 임상데이터와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

* 금오공과대학교 기계공학부

** 고려대학교 의대 흉부외과

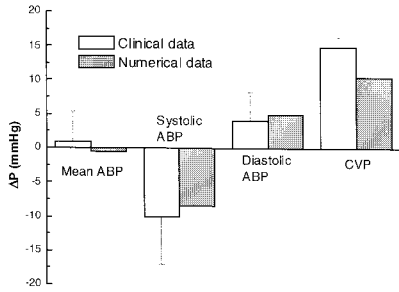


Fig. 3 Comparison of hemodynamic changes between the normal and the subject after the bypass procedure. In here $\Delta(\bullet) = (\bullet)_{\text{bypass}} - (\bullet)_{\text{normal}}$ and HR, ABP, CVP represent heart rate, arterial blood pressure, and central venous pressure, respectively

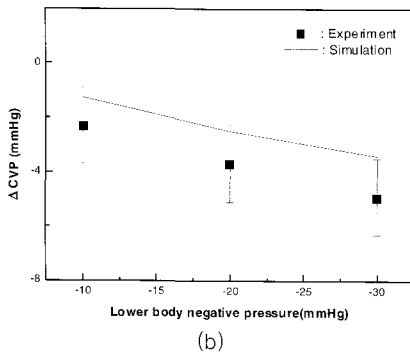
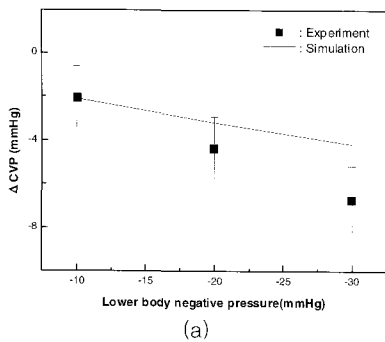


Fig. 4 Central venous pressure changes during graded LBNP for normal model (a) and bypass model (b). In here $\Delta(\bullet) = (\bullet)_{\text{LBNP}} - (\bullet)_{\text{no LBNP}}$

다음으로는 우심실 우회수술 환자에 미치는 중력의 영향을 평가하기 위한 실험인 LBNP(lower body negative pressure) test 시에 초래되는 생리학적 변화를 수치적으로 해석하였다. 그리고 이를 기존의 임상결과와 비교하였다. Fig. 4(a)에서 보듯이 수술 전 정상인의 경우, LBNP 압력의 감소에 따라서 정맥쪽 압력의 감소한다. 수술 후 환자의 경우 비슷한 경향을 보여주지만, 정맥압력의 감소정도는

정상의 경우와 비교할 때 비교적 작음을 보여주고 있는데, 이는 우회수술 후 venous tone의 증가로부터 기인한다.

다음 그림 Fig. 5는 수술 환자의 연결관 유체 저항에 의한 심박출량의 변화량을 도시한 것이다. 연결관의 저항증가로 인하여 수술환자의 심박출량이 상당히 감소하고 있음을 보여주고 있다.

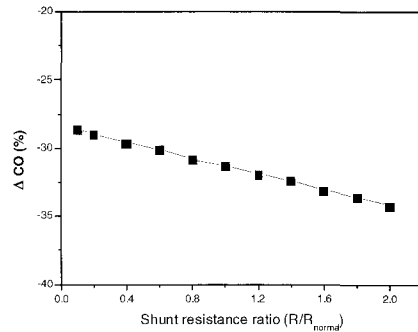


Fig. 5 Cardiac output changes of a patient after the bypass surgery according to the shunt resistance

4. 결론

본 연구에서는 atriopulmonary type 우심실 우회수술 이후 환자의 혈류역학적 상태 평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 코드를 개발하였다. 이를 위하여 lumped parameter model을 구현하였으며, 자율조절 기능인 baroreflex 및 cardiopulmonary reflex에 대한 모델링을 포함하였다. 우선 우회수술 전후의 생리학적 상태 변화를 임상적 자료와 비교 검토하여, 수치적 방법의 타당성을 검증하였다. 또한 LBNP test 시의 혈류역학적 변화, 연결관의 유동저항 증가에 따른 심박출량 변동에 대한 수치적 결과를 제시하였다.

참고 문헌

- (1) Gale, A. W., Danielsson, G. K., McGoon, D. C., and Mair, D. D., 1979, "Modified Fontan operation for univentricular heart and complicated congenital lesions," J. Thorac. Cardiovas. Surg., Vol. 78, pp. 831-838.
- (2) Heldt, T., Shim, E.B., Kamm, R.D. and Mark, R.G., 2002, "Computational modeling of cardiovascular response to orthostatic stress," Journal of Applied Physiology, Vol.92, pp. 1239~1254.
- (3) Kelley, J. R., Mack, G. W., and Fahey, J. T., 1995, "Diminished venous vascular capacitance in patients with univentricular hearts after the Fontan operations," American Journal of Cardiology, Vol. 76, pp. 158-163.