

급성 동정맥루를 포함한 심혈관계의 보상작용에 대한 혈류역학적 시뮬레이션

변수영* · 손정락** · 심은보*** · 노승탁**

1. 연구배경

인체의 심혈관 순환계는 크게 심장과 혈관계로 구성되어 있다. 혈관계 중 동맥은 심장에서 압출된 혈류에 의하여 고압으로 모세순환까지 혈액을 이송하고 정맥은 상대적으로 저압의 상태에서 모세순환 이후에서 심장까지 혈액을 회귀시키는 역할을 담당한다. 또한, 모세순환계는 동맥과 정맥을 이어 주면서 세포로 산소와 영양분을 공급해 주며, 대사후 물질을 수거하여 정맥으로 이송 시킨다.

심혈관계 중 일부 영역에서 혈관기형이나 동맥류에 의한 동맥파열 등으로 인하여 혈류가 정상적인 순환과정을 거치지 않고 갑자기 동맥에서 정맥으로 직접으로 흐르게 되는 현상이 발생하는데 이를 동정맥루(arteriovenous fistula)라고 한다. 이 경우 심혈관계는 생리학적, 혈류역학적으로 매우 복잡한 변화를 겪게 된다.⁽¹⁾

본 연구에서는 인체 우측 하지에 동정맥루가 발생한 경우를 설정하여 collateral 보상 이전 단계의 급성 동정맥루에 의한 심혈관계의 보상작용을 자율 조절 기능이 포함된 수학적 혈류역학 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

2. 동정맥루가 포함된 인체 심혈관계의 혈류역학적 모델

우측 하지에 동정맥루가 발생한 경우가 포함된 심혈관계의 전기회로 상사도는 그림 1 과 같다. 전체 심혈관 순환계는 체순환계와 폐순환계로 나누었고, 체순환계는 다시 상지부와 하지부, 신장순환계와 내장순환계로 세분하였다. 하지부는 다시 우측과 좌측으로 나누었고, 그 중 우측에 동정맥루가 발생한 것으로 설정하였다. 전기 회로도 상의 전기 저항은 혈관의 유동저항을 의미하며, 혈관 및 심장의 compliance는 capacitance에 해당한다. 구성된 회로에

Kirchhoff 법칙을 적용하면 회로의 각 요소에서의 혈압에 대한 상미분 방정식을 유도 할 수 있다.⁽²⁾ 인체 심혈관계의 자율 조절기능은 경동맥 압력을 기준으로 맥박수, 심장의 수축성, 혈류저항 등의 요소들을 제어할 수 있도록 그림 2와 같은 baroreceptor reflex 제어 로직을 구성하였다. 따라서, 그림 1의 전기 회로 상사도를 기본으로 한 각 구성 요소에서의 혈압에 대한 지배방정식과 자율 조절 기능 모사를 위한 그림 2의 제어 로직을 결합한 모델을 바탕으로 급성 동정맥루에 의한 심혈관계의 보상작용을 고찰 할 수 있다.

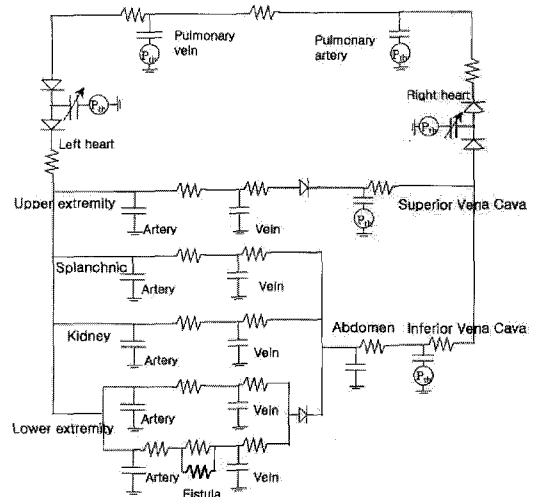


Fig. 1 Electric circuit diagram of the cardiovascular system including arteriovenous fistula at right lower extremity

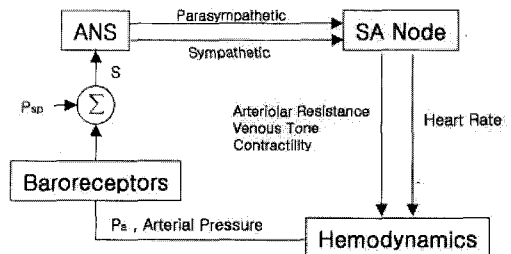


Fig. 2 Schematics of baroreceptor reflex control logic

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 금오공과대학교 기계공학부

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 3은 우측하지의 동정맥루로 인한 동맥으로부터 정맥으로의 직접 통과 유량이 증가할수록 심혈관계의 전체 심박출량이 증가함을 보여주고 있다. 이는 동정맥루 부위에서의 저항감소에 의한 혈압의 강하를 억제하기 위한 보상현상이라고 할 수 있다. 이는 동물 실험으로부터 얻어진 결과와도 일치하는 경향을 보이고 있다.⁽³⁾ 그림 4로부터 하지 부에서는 동정맥루 유량이 증가함에 따라 좌측 하지로 유입되는 혈유량은 변화가 없지만 동정맥루가 위치한 우측 하지에서는 보상작용으로 인하여 유입 혈유량이 증가함을 알 수 있다. 또한, 좌측 하지의 동맥과 정맥의 혈압은 동정맥루 유량과 상관없이 거의 일정한 반면 우측하지의 경우에는 동정맥루 유량의 증가에 따라 동맥의 경우에는 혈유량의 감소로 인하여 혈압이 감소하는 반면, 정맥의 경우에는 혈유량의 증가로 인하여 혈압이 증가함을 알 수 있다.

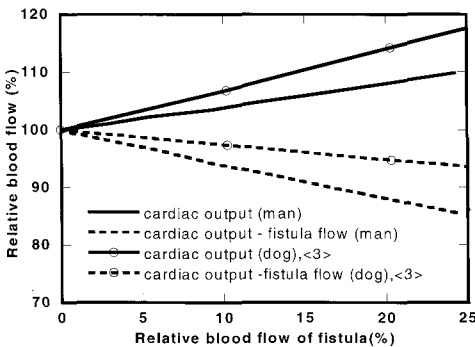


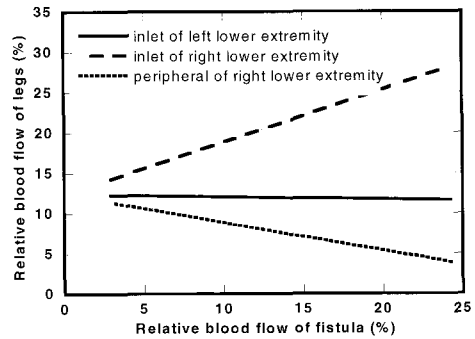
Fig. 3 Compensation characteristics of cardiac output due to blood flow in fistula at right lower extremity

4. 결론

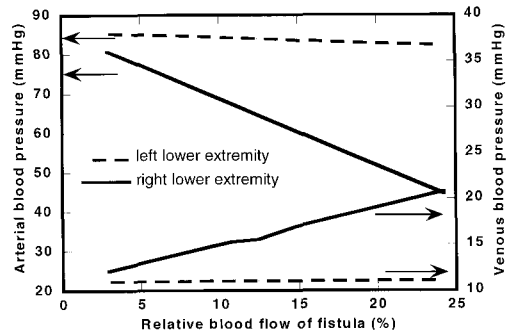
우측 하지의 급성 동정맥루를 포함한 인체 심혈관계의 보상작용을 제어 로직이 포함된 전기 회로 상사에 의한 수학적 모델을 이용하여 시뮬레이션 한 결과 다음과 같은 현상을 관찰할 수 있었다.

동정맥루 유동으로 인한 혈압강하에 의한 보상작용으로 심박출량이 증가하였으며, 동정맥루가 위치한 우측 하지로의 유입 혈유량이 증가하였다.

동정맥루로 인하여 우측 하지의 동맥 혈압은 강하하였으며, 정맥 혈압은 증가하였다.



(a) Blood flow



(b) Blood pressure

Fig.4 Compensation characteristics of blood flow rate and pressure in legs due to blood flow in fistula at right lower extremity

후 기

본 연구는 2002년도 BK 21 사업에 의해서 지원 되었음.

참고문헌

- (1) Lee, B.B., 2002, "Impact of Complex Hemodynamics to the Management of Arterio Venous Fistula," Proc. the Second National Congress on Fluids Engineering, Muji, Korea, pp. 9~10.
- (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) Guyton, A. C., and Sagawa, K., 1961, "Compensations of cardiac output and other circulatory functions in areflex dogs with large A-V fistulas," American Journal of Physiology, Vol. 200, pp. 1157~1163.