

## 뇌순환계 혈류역학에 대한 시스템 해석

심 은보\* · 고 형종\* · 민 병구\*\*

### System analysis on the hemodynamics of cerebral circulation

Eun Bo Shim\*, Hyung Jong Ko\*, Byung Goo Min\*\*

**Keywords** : Cerebral circulation(뇌혈류 순환계), System analysis(시스템 해석), Lumped parameter model, Hemodynamics(혈류역학), 박동형 심폐보조기(T-PLS)

#### Abstract

The aim of this work is to analyze changes in cerebral hemodynamics and intracranial pressure mediated by cerebral blood flow challenges in patients with acute heart arrest. Lumped parameter model with feedback mechanism is utilized to simulate the hemodynamics of brain blood flow in case 40 min T-PLS operation is applied to patients of cardiac arrest. Numerical solutions show that cerebral blood flow and perfusion pressure in patients of cardiac arrest are sharply recovered in the initial state of T-PLS operation.

#### 1. 서론

뇌에서의 혈류역학은 그 의학적 중요성으로 인하여 수없이 많은 의학자 및 생명공학자 들의 연구의 대상이 되어 왔으며, 이에 관한 많은 연구결과 들이 제시된 바 있다.

이러한 뇌 혈류역학에 관한 연구는 주로 실험적 및 임상적인 방법들을 통하여 이루어진 바 있다. 그러나 최근 들어 컴퓨터 시뮬레이션의 급격한 발달과 더불어 뇌순환계(cerebral circulation)의 혈류역학에 대한 수치적 모델링 연구들이 1990년대부터 Ursino 등에 의하여 시도되기 시작하였다[1].

본 연구에서는 기존의 뇌 혈류 모델링 연구와는 달리 전체 심혈관계와 결부된 뇌순환계의 혈류역학 시스템 모델을 구현하였다. 이를 위하여 본 저자들에 의하여 개발된 심혈관계 모델[2]에 뇌혈류 순환계 부분을 첨가하였다. 이러한 전체적인 뇌순환계 구성을 통하여 뇌혈류 자체 뿐만 아니라 심혈관계에 의해서 파생되는 뇌순환계의 혈류역학적 영향 등을 파악할 수 있다. 먼저 여기에서는 구현된 뇌순환계의 생리학적 결과를 기존의 연구와 비교하였다. 그리고 이와 같이 검증된 모델을 박동형 심폐보조기(TPLS)의 임상적용 사례를 모사하는데 활용하였다. 즉 호흡 정지된 환자에 대해 인공심폐기를 시술할 경우, 이로 인한 뇌혈류 회복현상을 뇌순환계의 혈류역학 모델을 활용하여 수치적으로 해석하고 그 결과를 분석하였다.

#### 2. 수치적 모델

##### 뇌순환계 모델링

뇌순환계는 다른 여타의 심혈관계와는 달리, 혈액과 뇌척수액(cerebrospinal fluid)의 two-fluid system으로 구성된다(Fig. 1).

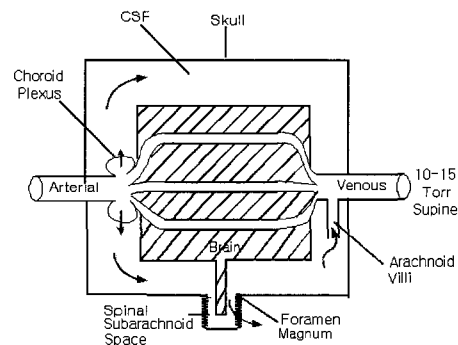


Fig. 1. Schematic of cerebral circulation

이를 단순화시키고 lumped model을 사용하여 모델링하면, 최종적으로 저항, capacitance 등의 전기회로 형식으로 표시될 수 있으며, Fig. 2와 같은 system이 나오게 된다. 즉 이와 같은 전기회로 방식의 문제를 풀면 시간에 따른 혈류역학적 변수들을 구할 수 있다. 이때 뇌순환계의 자율조절 기능에 대한 고려가 반드시 요구되며, 여기에서는 주로 뇌혈류량의 조절과 관련된 feedback mechanism만을 고려하였다.

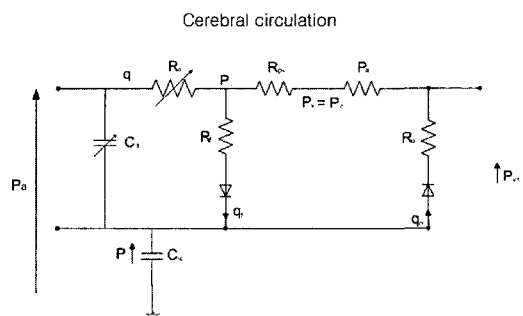


Fig. 2. Lumped parameter model of cerebral circulation

위의 그림에서 하첨자 a, c, vs, ic, f, o 는 각각 artery, capillary, vein, intracranial, choroïd plexus, arachnoid villi 를 각각 의미한다.

\* 금오공과대학교 기계공학부, simeb, kohj@kumoh.ac.kr

\*\* 서울의대, bgmin@plaza.snu.ac.kr

### 3. 협착이 있는 관상동맥의 형상

관상동맥은 매우 복잡한 기하학적 형상을 가지고 있다. 혈관확장술시 편심형태의 협착이 있는 관상동맥의 형상은 Fig. 1과 같다.<sup>(3)</sup> 협착부의 협착율은 약 65%이다. 편심 형태의 협착은 동심형태의 협착부의 중심에서 0.3mm 정도 밀로 내려간 형태가 많아 본 연구에서는 동심형태의 협착의 결과와 비교하기 위하여 협착의 길이와 형상은 같게 해주었다. Fig. 1은 카테터 프로브가 혈관내에 삽입된 모델로서 카테터의 중심축은 혈관의 중심과 일치한 경우이다.<sup>(1,2)</sup>

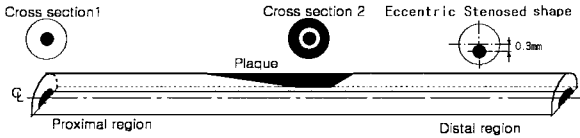
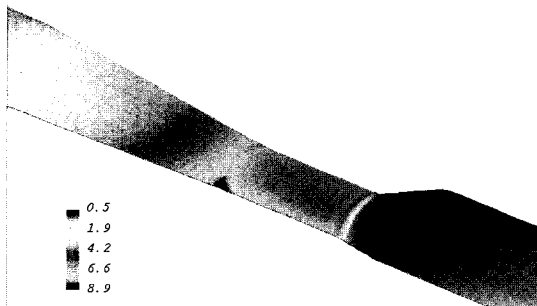


Fig. 1 Geometrical configuration of the stenosed coronary artery

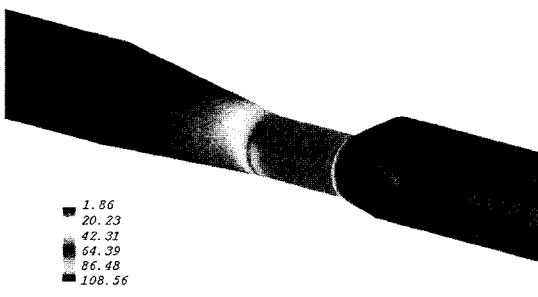
### 4. 결과 및 토의

Fig. 2와 Fig. 3에는 동심인 형태와 편심인 형태의 협착부가 있는 관상동맥 모델내에 카테터를 삽입하였을 경우의 가속시와 감속시의 표면전단응력분포를 나타내었다. 카테터에 작용하는 응력값보다는 협착된 관상동맥에서 카테터의 응력으로 인하여 미치는 전단응력값을 나타낸 것이다. 편심인 경우에는 혈관의 형상이 대칭이 아님으로 전체를 모델화하여 나타내었지만, 동심인 경우는 협착부의 아래와 위가 대칭이므로 Fig. 1의 윗쪽만 계산된 1/2모델에 대해 전단응력분포를 나타내었다.

Figs. 2, 3에서 보듯이 속도는 협착부의 형상이 동심인 경우보다 편심인 경우의 전단응력이 가속시에는 12배, 감속시에는 10배정도의

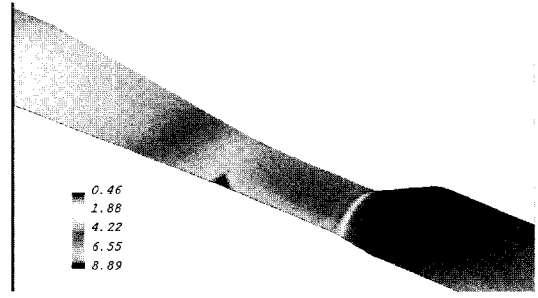


(a) concentric stenosed shape

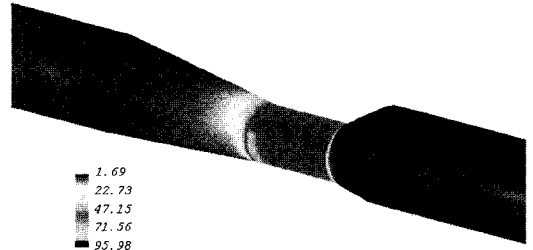


(b) eccentric stenosed shape

Fig. 2 Wall shear stress distributions on the surfaces of the concentric and eccentric stenosed coronary arteries (acceleration phase)



(a) concentric stenosed shape



(b) eccentric stenosed shape

Fig. 3 Wall shear stress distribution on the surfaces of the concentric and eccentric stenosed coronary arteries (deceleration phase)

전단응력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한, 가속이나 감속시 모두 편심인 형태의 경우에는 아래쪽 즉 협착이 얇게 형성된 곳에서 좀 더 큰 전단응력이 미치고 있음을 알 수 있다.

저자들의 선행연구결과<sup>(1)</sup>로부터 카테터의 삽입으로 인하여 카테터의 지름과 유사한 관상동맥 혈관에서는 최대 10배 이상의 유동붕쇄 효과를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이러한 경향은 편심일 경우에는 더욱 더 심각하게 일어남을 알 수 있었다. 더 나아가 수술시 갑작스러운 카테터의 삽입으로 인한 전단응력의 증가는 경화된 협착부위를 강하게 짓누를 수 있고, 전단응력이 크게 작용하는 동맥경화 죽상반의 모양이 찌그러지거나 파열되어 죽상파편이 혈관 말단부로 감으로 지름이 작은 혈관을 막을 수 있는 가능성이 있음을 유추할 수 있었다.

### 5. 결론

편심형태로 협착된 관상동맥내 카테터 삽입에 따른 혈액유동특성을 수치해석하였다. 편심된 경우에 관상동맥에 미치는 전단응력은 동심인 경우보다 평균 11배정도 더 큼을 알 수 있었다. 카테터 삽입으로 인해 전단응력이 크게 작용하는 동맥경화 죽상반의 모양이 찌그러지거나 파열되어 될 수 있음을 확인하였다. 이러한 사실은 편심인 형태로 발생한 관상동맥내에서는 중재술시 세밀한 주의가 필요함을 의미한다.

### 참고문헌

- [1] 노형운, 김재수, 서상호, 권혁문, "카테터 삽입에 따른 협착 관상동맥내 혈류특성변화", 춘계기계학회 학술대회 논문집(2002)
- [2] Cho, Y. I. and Kensey, K. R., "Effects of the Non-Newtonian Viscosity of Blood on Hemodynamics of Diseased Arterial Flows", *Advances in Bioengineering*, Vol. 15(1989), pp. 147~158.
- [3] Suh, S. H., Yoo, S. S., and Roh, H. W., Numerical Analysis of Branch Flows for Newtonian and Non-Newtonian Fluids", *KSMSE J.* Vol. 18, No. 10(1994), pp. 2762~2772.