

뇌혈류 수치모델을 이용한 의료기기 알고리즘 및 진단기법의 개발

유재영*

Diagnostic Algorithms to Monitor Cerebrovascular Complications Using Mathematical and Numerical Models

Jaiyoung Ryu*

Abstract : Early diagnosis of vasospasm after subarachnoid hemorrhage (SAH) can prompt aggressive treatment and improve neurological outcomes. Transcranial Doppler (TCD) is the only diagnosis modality that is noninvasive and available bedside. The purpose of this study was to numerically evaluate the relevance of various blood velocity indices in detection of vasospasm, and to improve the accuracy of diagnosis using TCD. We employed a well validated numerical model of arterial blood flow coupled with a sophisticated intracranial model to generate a cerebral blood flow database. Anterior (MCA and/or ACA) and posterior (PCA and/or basilar arteries) vasospasms were considered under normal and impaired cerebral autoregulation conditions. For all vasospasm locations considered, normalization of velocities by upstream and contralateral velocities provided robust detection. These indices are particularly effective in cases of severe vasospasm where traditional TCD indices (absolute velocities, Lindegaard index) become problematic.

1. 서 론

지주막하출혈 후 3일에서 3주 사이에 발생할 수 있는 뇌혈관연축은 최초 출혈 생존자 사이에서 가장 주요한 사망 및 후유 장애의 원인이다. 조기 발견 후 공격적인 투약 및 시술은 예후를 향상시킬 수 있다. 디지털 감산혈관조영술 (DSA), CTA, MRA 등 정확한 진단을 가능하게 하는 혈관조영기법들이 존재하지만, 고비용과 신경외과중환자실 환자들의 대형 장비들에 대한 제한된 접근성 등으로 인해 현실적으로 조기발견을 위하여 하루 1회 이상 적용하는 것은 어려운 상황이다. 경두개초음파검사 (TCD) 의 경우 비침습적이고, 비용이 저렴하며, 중환자실내 침상에서 언제나 측정할 수 있다는 장점이 있으나, 진단 정확도가 낮아서 보조적인 진단기법으로만 활용되고 있다.

본 연구의 목표는 TCD진단의 정확성을 향상시킴으로서 뇌연축증상의 효과적 조기발견을 가능하게 하는데 있다. 이를 위해서는 다양한 뇌혈관연축증상에 해당하는 포괄적인 뇌혈관혈류속도 데이터가 필요하다. 이러한 데이터베이스를 임상실험을 통해 다른 질환과

의 연관관계를 제어하는 가운데 정확하게 구축하는 일은 비용이나 시간 측면에서 매우 어려운 일이므로, 본 연구에서는 최근 개발하고 검증한 뇌혈류수치모델을⁽¹⁾ 이용하여 뇌혈관연축증상을 가상실험하는 방식으로 뇌혈류데이터베이스를 생성하였고, 이를 이용하여 향상된 뇌혈류속도지표 그룹을 개발하였다.

2. 본 론

2.1. 뇌혈관연축시 혈류속도 데이터베이스 생성

최근 개발한 뇌혈류수치모델을⁽¹⁾ 적용하여 다양한 뇌혈관연축증상들을 가상실험하여 뇌혈관연축과정에서 발생하는 뇌혈류속도를 포괄적으로 측정하였다. 시물레이션에서는 주요 뇌동맥 뿐만 아니라 대동맥, 상완동맥 등 뇌혈류에 직간접적으로 영향을 미칠수 있는 주요 동맥내의 혈류가 Navier-Stokes식의 해로서 해석되었다. 해당 동맥들은 Figure 1 (Left)에 직선으로 표시되어 있다. 그 가장 말단에서는 (흰색과 검은색 원) 수학적모델로서 이후 동맥, 모세혈관, 정맥의 영향들이 고려되었다. 흰색 원은 대뇌동맥들의 말단에 해당하고, 이 경우 Figure 1 (Right) 에 나타난 바와 같이 대뇌

* 중앙대학교 공과대학 기계공학부 조교수

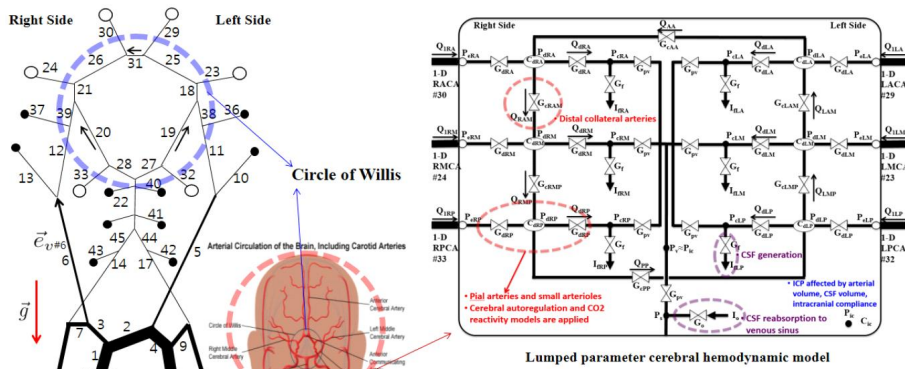


Figure 1. A one-dimensional nonlinear model of blood flow in the cerebral and systemic arteries (left) coupled to lumped parameter networks representing distal vasculature systems (right).

의 혈류 자동 조절 능력, 교통동맥, 뇌척수액과 두개내압의 작용 등의 주요한 대뇌 혈류 메커니즘들이 대뇌 혈류수학모델로서 적용되어있다.

전대뇌동맥 (Anterior Cerebral Artery, ACA), 중대뇌동맥 (Middle Cerebral Artery, MCA), 후대뇌동맥 (Posterior Cerebral Artery, PCA), 뇌저동맥 (Basilar Artery, BA) 등에서 발생하는 뇌혈관연축 현상을 경증부터 중증까지 단계적으로 시뮬레이션 하였다. 주요 뇌동맥을 비롯한 관련 동맥들에서의 (내경동맥 ICA, 척수동맥 VTA) 혈류 속도를 모니터링하였다.

지주막하출혈환자들은 흔하게 대뇌자동조절기능 (Cerebral Autoregulation) 의 손상을 입고 이에 따라 뇌혈류 유지 기능이 저하되고 뇌혈관연축의 예후가 더욱 심각하므로, 본 연구에서는 뇌혈류수학모델에서 대뇌자동조절기능이 손상된 경우도 함께 고려하였다.

2.2. 혈류속도지표에 의한 뇌혈관연축 진단

혈관연축이 경증에서 중증으로 진행되는 동안 해당 혈관에서의 혈류속도는 증가하다가 (혈류의 양의 감소 대비 혈관 너비의 감소가 심하므로) 연축이 중증에 이르면 혈류의 양이 급격히 감소하고 이에 따라 혈류 속도도 감소하게 된다. 현재의 TCD 진단은 혈류속도의 증가를 뇌혈관연축의 증상으로 파악하므로 중증의 뇌혈관연축을 진단하지 못한다. 이는 연축혈관 혈류 속도 대비 상류 혈관 혈류 속도의 비율로 진단하는 Lindegaard 지표의 경우도 마찬가지다.

본 연구에서는 좌우혈류속도비 (e.g. V_{RACA}/V_{LACA} : 좌우 내경동맥 혈류속도비), 전후혈류속도비 (e.g. V_{RACA}/V_{RPCA} : 전후 대뇌동맥 혈류속도비) 등의 새로운

혈류속도지표들을 제안하였다.⁽²⁾ 시뮬레이션으로 재현한 모든 뇌혈관연축 상황에 대하여 이러한 혈류속도지표들을 모니터링한 결과, 기존의 지표 대비 정확한 진단 능력을 보였다.

3. 결론

- 1) 뇌혈류수치모델을 이용하여 지주막하출혈 이후 발생하는 뇌혈관연축시의 포괄적인 뇌혈류속도 데이터베이스를 생성하였다.
- 2) 뇌혈관연축 증상을 TCD를 이용하여 보다 폭넓게 그리고 정확하게 진단할 수 있는 혈류속도지표 그룹을 개발하였다.
- 3) 기존의 TCD 혈류속도지표들은 중증 뇌혈관연축에 적용할 수 없으나, 제시된 지표들은 중증에 더욱 효율적이다.

참고 문헌

- (1) Ryu, J., Hu, X., Shadden, S. C., 2015, "A Coupled Lumped-Parameter and Distributed Network Model for Cerebral Pulse-Wave Hemodynamics." *Journal of Biomechanical engineering* 137.10:101009.
- (2) Ryu, J., Hu, X., Shadden, S. C., 2016, "New Blood Velocity Indices Can Improve the Accuracy of Transcranial Doppler to Detect Vasospasm After Subarachnoid Hemorrhage." *Stroke* 47. Suppl 1: ATMP103. International Stroke Conference, Los Angeles, CA.