

원저

혈류역학을 이용한 촌구와 인영의 특성비교

신상훈* · 박대훈** · 박영재*** · 박영배*

*경희대학교 한의과대학 진단·생기능의학과학교실

**국립암센터 암실험자원 연구과

***세명대학교 한의과대학 침구학교실

Abstract

Comparative study of pulse point using hemodynamics

Shin Sang-hoon*, Park Dae-hun**, Park Young-jae*** and Park Young-bae*

*Dept. of Biofunctional Medicine and Diagnosis, College of Oriental Medicine, Kyung Hee University

**Cancer Experimental Resources Branch, National Cancer Center

***Dept. of Acupuncture & Moxibustion, College of Oriental Medicine, Sae-Myung University

Objectives : The purpose of this study is to examine the hemodynamic characteristics of pulse point.

Methods : The computational analysis algorithms of arterial tree system was derived. In order to investigate the effect of internal organ on the pulse point, the diameter of celiac artery was reduced by half.

Results : The sensitivity of flow change at the Inyoung(Renying) is better than that of the Chongu(Cunkou), but the Inyoung was worse than the Chongu in the point of the left and right symmetry. The pressure changes at the Inyoung and the Chongu were in the similar range.

· 접수 : 2004년 9월 11일 · 수정 : 2004년 9월 18일 · 채택 : 2004년 9월 18일

· 교신저자 : 박영배, 서울특별시 동대문구 회기동 경희대학교 한의과대학

Tel. 02-967-4894 E-mail : bmppark@khu.ac.kr

Conclusions : It was found from the result that the Chongu shows the more symmetrical hemodynamic characteristics than the Inyoung.

Key words : Hemodynamics, Pulse Point, Vascular Impedance, Pressure, Flow

I. 서론

William Harvey가 혈류의 순환을 실험적으로 증명한 1628년 이후로 순환계의 현상을 설명하기 위한 많은 시도가 있었다. 혈류역학(hemodynamics)은 혈관계 내의 혈액의 유동현상을 다루는 유체역학의 한 분야이다.

심장에서 반복적으로 분출되는 혈액은 상행대동맥(ascending aorta)에 압력파(pressure waves)와 유동파(flow waves)를 형성하며, 이러한 맥동유동(pulsatile flow)은 동맥계(arterial system)에 의하여 정상상태(steady flow)의 유동으로 바뀐다. 동맥계에 대한 고전적인 해석은 동맥계 전체를 탄성이 있는 확장 가능한 챔버(chamber)로 생각하는 Windkessel모델¹⁾이다. 이 개념은 1808년 Young²⁾이 동맥계에서의 파동 전달현상을 주장할 때 까지 계속되었다. 맥파의 전달속도를 최초로 측정하는 것은 1825년 Weber 형제³⁾에 의해서다. 그들은 맥파의 속도와 혈관벽의 탄성(elastic properties)이 관계있음을 알고, 둘 사이의 관계식을 유도하려고 하였으나 이는 1878년 Moens⁴⁾와 Korteweg⁵⁾에 의해서 비로소 수식화 되었다.

혈관 임피던스(vascular impedance)개념은 동맥계의 특성을 논하는데 있어 매우 중요한 역할을 한다. 1955년까지, 신뢰할 만한 유량계(flow

meter)가 개발되지 못하였으므로, 유동에 대한 정보는 압력측정을 통하여 간접적으로 얻어야만 하였다. Womersley⁶⁾는 압력구배(pressure gradients)가 있는 맥동유동의 해석에 임피던스 개념을 도입하였다. 유동에 대한 실질적인 측정이 가능해짐과 동시에 연구자들은 임피던스를 측정하기 시작하였으며, 1956년 Randal⁷⁾이 개의 대퇴동맥(femoral artery)에서 최초로 임피던스를 측정하였다.

Womersley는 혈관을 강성튜브(rigid tube s)내의 유동으로 해석하였다⁶⁾. 다음으로 혈관을 탄성튜브(elastic tubes)⁸⁾로 모델링 하였으며, 최종적으로는 점탄성튜브(viscoelastic tubes)⁹⁾로 모델링 하였다. 그는 혈관주위의 조직에 의한 혈관의 구속효과를 고려하였으며¹⁰⁾ 맥파의 반사(reflection of pulse waves)효과¹¹⁾도 고려하였다.

동맥계의 혈류현상을 보다 더 자세히 해석하기 위해서 동맥계의 다분지(multi-branch) 특성이 고려되어야한다. Westerhoff¹²⁾는 전자회로를 이용하여 121개의 분지로 이루어진 동맥계 아날로그 모델을 개발하였다. Avolio¹³⁾는 컴퓨터에서 적용이 가능한 다분지 동맥계의 해석 알고리즘을 개발하였다.

본 연구에서는 동맥계의 혈류현상을 해석하는 해석 알고리즘에 대하여 고찰하고, 이를 이용하여 맥진의 부위¹⁴⁻¹⁸⁾로 사용되는 촌구와 인영에 대한 혈류역학적 특성을 고려한다.

II. 동맥계의 해석 알고리즘

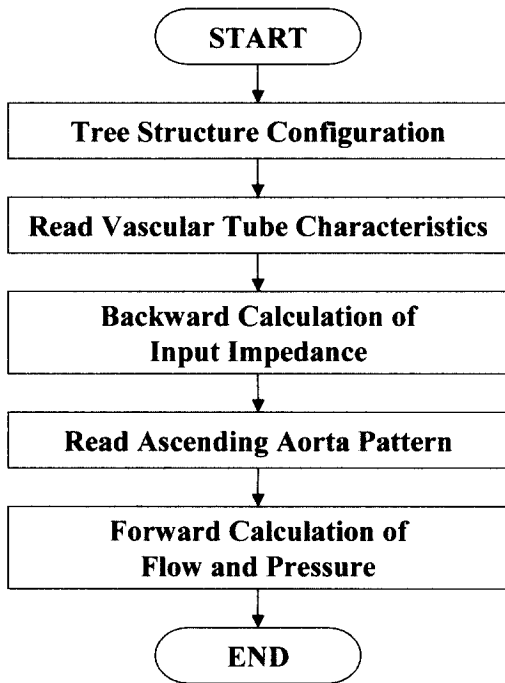


Fig. 1. Computational algorithm

Fig. 1에 의하면, 동맥계 해석 알고리즘의 전반적인 흐름은 다음과 같다. 먼저, 동맥계의 분지구조를 정의한 다음, 각 분지에 대한 혈관특성에 관한 입력값을 읽어 들인다. 말초동맥으로부터 상행대동맥 방향으로 혈관의 입력 임피던스를 계산하고, 입력으로 주어진 상행대동맥의 입력패턴과 입력 임피던스를 이용하여 상행대동맥으로부터 말초동맥 방향으로 각 분지에 대한 압력과 유동을 계산한다.

1. 동맥계의 분지구조 모델링

동맥계를 해석하기 위해서는 동맥계의 기하학적 구조에 대한 모델링이 필요하다. 여기서는 동

맥의 분지구조를 모델링하는 방법에 대하여 언급한다.

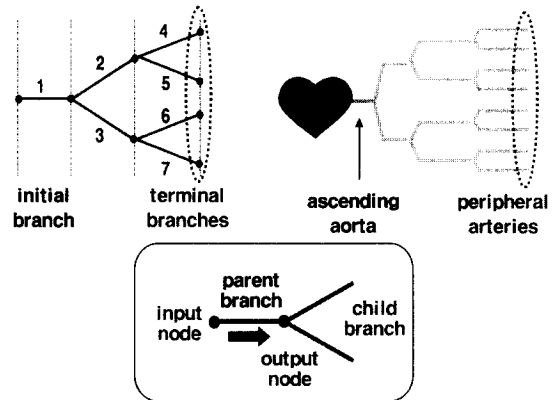


Fig. 2. Tree structure configuration

하나의 부모가지(parent branch)에서 몇 개의 자식가지(child branches)로 갈라지는 분지현상의 반복에 의하여, 동맥계는 수 많은 분지구조로 되어 있다. 분지구조의 기본단위는 가지(branch)와 절점(node)이다. 하나의 가지에는 입력절점(input node)과 출력절점(output node) 이라는 두 개의 절점이 존재한다. 혈류는 입력절점으로 들어와 출력절점으로 나간다.

해석을 위해서는 절점과 가지의 각각에 대하여 번호를 부여하여야 하는데, 상행대동맥(ascending aorta)에서 시작하여 말초동맥(peripheral artery) 방향을 따라 번호를 부여한다. 그러므로 상행대동맥에 해당되는 가지는 1번이며 이를 시작가지(initial branch)라고 한다. 자식가지가 존재하지 않는 가지를 말단가지(terminal branch)라고 한다.

2. 입력 임피던스 계산

혈관의 임피던스 개념은 전자공학에서 빌려온 것이며 다음과 같이 정의된다.

$$Z(x) = \frac{p(x,t)}{q(x,t)}$$

여기서 p 는 압력을 나타내며, q 는 유동을 나타낸다.

혈관 내에서 파동의 반사현상이 존재하지 않는 경우의 임피던스를 특성 임피던스(characteristic impedance, Z_c)라 하며, 파동의 반사현상이 존재하는 경우 입력절점에서의 임피던스를 입력 임피던스(input impedance, Z_i), 출력절점에서의 임피던스를 말단 임피던스(terminal impedance, Z_T)라 한다¹⁹⁾.

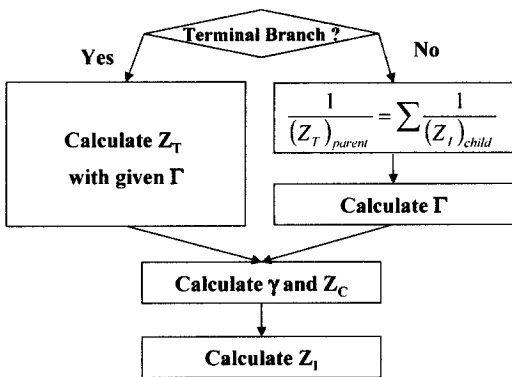


Fig. 3. Input impedance calculation

입력 임피던스는 말단가지(말초동맥)로부터 시작가지(상행 대동맥)를 향하여 계산되어지며, 계산절차는 Fig. 3과 같다. 입력 임피던스는 반사상수(reflection constant, Γ), 파동전파계수(wave propagation coefficient Υ), 그리고 특성 임피던스의 함수이다. 말단 임피던스는 말단가지에서는 주어진 반사상수로부터 계산되어지나, 그 이외의 경우는 가지의 입력 임피던스로부터 구해진다¹⁹⁾.

3. 압력과 유동해석

압력과 유동은 시작가지(상행 대동맥)로부터

말단가지(peripheral artery)방향으로 계산되어지며, 계산절차는 Fig. 4와 같다.

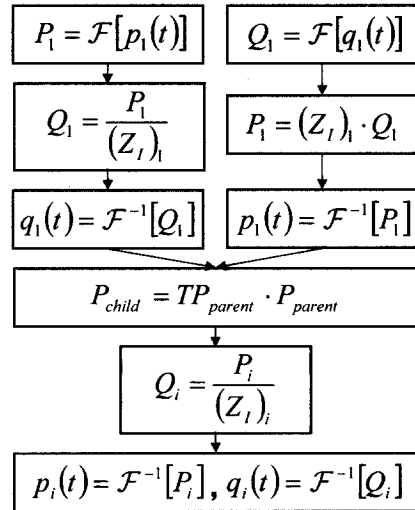


Fig. 4. Pressure and flow calculation

각 가지의 압력과 유동을 계산하기 위해서는 상행 대동맥의 압력패턴 ($p_i(t)$)이나 유동패턴 ($q_i(t)$)을 알아야 한다. 상행 대동맥의 입력패턴이 주어지면, 푸리에 변환(Fourier Transformation, $F[\]$)을 사용하여 주파수 영역(frequency domain)으로 변환시킨 다음, 압력과 유동사이의 관계식을 적용하여 상행 대동맥의 나머지 정보를 구한다. 주파수 영역의 정보는 역푸리에 변환(Inverse Fourier Transformation, $F^{-1}[\]$)을 사용하여 시간영역(time domain)의 정보로 변환한다.

상행 대동맥 이외의, 다른 가지의 압력은母子關係로부터 구할 수 있다. Fig. 4에서 TP 는 입력절점과 출력절점의 압력비를 나타낸다¹⁹⁾.

압력과 유동사이의 관계식으로부터 유동의 정보를 구한 다음, 역푸리에 변환을 이용하여 시간영역의 정보로 변환한다.

Ⅲ. 연구결과

동물실험을 통하여 본 연구에서 제안된 동맥계의 혈류해석 알고리즘의 타당성을 검증하였다¹⁹⁾. 이를 바탕으로, 본 연구에서는 인체의 동맥계 모델¹⁾을 해석 알고리즘에 적용하여 맥진의 부위로 사용되는 촌구와 인영의 혈류역학적 특성을 살펴 보고자 한다.

Fig. 6. Input pressure pattern of ascending aorta

Fig. 7. Computed flow pattern of ascending aorta

Fig. 5. Human arterial tree

Fig. 8. Computed pressure pattern of carotid artery and radial artery

Fig. 9. Computed pressure change of celiac artery

Fig. 10. Computed flow change of celiac artery

Fig. 11. Computed pressure change of carotid artery and radial artery

Fig. 12. Computed flow change of carotid artery and radial artery

혈류해석에 적용된 인체의 동맥계 분지모형¹⁾은 Fig. 5와 같다. Fig. 6의 상행대동맥 압력패턴을 입력으로 하여 계산된 상행대동맥의 유동패턴은 Fig. 7과 같다.

Fig. 8은 Fig. 6의 압력패턴을 입력으로 하여 계산된 총경동맥(Carotid Artery: 20번, 22번 가지)과 요골동맥(Radial Artery: 97번, 100번 가지)의 압력패턴을 나타낸다.

Fig. 9과 Fig. 10는 복강동맥(Celiac Artery: 49번 가지)의 혈관지름이 반으로 감소되었을 때의 복강동맥의 압력과 유량의 변화를 나타낸다. Fig. 11과 Fig. 12는 이때의 총경동맥과 요골동맥에서 압력과 유량의 변화를 나타낸다.

IV. 고 찰

총경동맥은 인영이 존재하는 곳이며, 요골동맥은 촌구가 존재하는 곳이다. Fig. 8에 의하면 좌우의 촌구에서는 압력과 유동에 대하여 동일한 특성을 보이는 반면, 인영은 좌우의 압력차가 존재하며, 이는 동맥계 분지구조의 불균형에 기인한

다고 생각된다. 즉 오른쪽 총경동맥의 부모가지는 완두동맥(brachiocephalic artery: 6번 가지)인 반면 왼쪽 총경동맥의 부모가지는 동맥궁(aortic arch: 2번 가지)이다.

인체 내부장기(internal organ)의 혈류변화에 따른 맥진부위의 변화를 관찰하기 위하여, 본 연구에서는 인체의 주요 장기와 연관된 복강동맥의 특성을 변화시켜 인영과 촌구에서의 변화 특성을 알아보았다. 복강동맥(49번 가지)은 위동맥(gastric artery: 61번 가지), 비장동맥(splenic artery: 62번 가지), 그리고 총간동맥(common hepatic artery: 63번 가지)을 자녀가지로 두고 있다.

내부장기의 혈류변화를 유도하기 위하여 복강동맥의 지름을 반으로 줄였으며, Fig.9-Fig.12는 이 때의 변화를 나타낸다. Fig.10에 의하면 복강동맥의 혈류량은 눈에 띄게 감소하는 반면, Fig.9에 의하면 복강동맥의 압력변화는 미미함을 알 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 복강동맥의 혈류변화가 인영과 촌구에 미치는 혈류역학적인 변화를 나타내었다. 촌구는 좌우측이 동일한 변화 특성을 보이나, 인영은 좌우의 불균형 특성을 보인다. 인영의 압력특성은 혈류특성의 불균형에도 불구하고 유사한 특성을 보인다. 주어진 데이터¹⁾에 의하면 총경동맥의 지름은 요골동맥 지름의 2.3배에 달함에도 불구하고 압력특성은 촌구와 인영이 비슷한 범위임을 알 수 있다.

혈류역학에 사용되는 인체모델¹⁾로 해석한 결과에 의하면, 인영이 위치하는 총경동맥보다는 촌구가 위치하는 요골동맥에서 좌우 대칭적인 정보를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

인체 내부장기와 밀접한 연관성을 가지는 복강동맥의 변화에 대한 유동특성의 변화량은 인영이 위치한 총경동맥의 변화량이 촌구가 위치하는 요골동맥보다 더 크나, 좌우 불균형한 정보를 제공하는 단점이 있다. 그러나 압력의 측면에서는 인영과 촌구가 서로 비슷한 범위의 변화를 보이고

있으며, 인영에서의 좌우 불균형도 해소되고 있음을 알 수 있다.

V. 참고문헌

1. Avolio, A.P.. Hemodynamic studies and modeling of the mammalian arterial system. Sydney, PhD thesis, University of New South Wales. 1976.
2. Young, T.. On the functions of the heart and arteries. Philosophical Transactions. 1809 ; 99 : 1-31.
3. Weber, E.H., Weber, W.E.. Wellenlehre. Leipzig, Fleischer. 1825.
4. Moens, A.I.. Die Pulskurve. Leiden. 1878.
5. Korteweg, D.J.. Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in elastischen Röhren. Annalen der Physik und Chemie. 1878 ; 5 : 525-42.
6. Womersley, J.R.. Method for the calculation of velocity, rate of flow and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known. Journal of Physiology. 1955 ; 127 : 553-63.
7. Randall, J.E., Stacy, R.W.. Mechanical impedance of the dog's hind leg to pulsatile blood flow. American Journal of Physiology. 1956 ; 187 : 94-8.
8. Womersley, J.R.. Oscillatory motion of a viscous liquid in a thin-walled elastic tube. I. The linear approximation for long waves. Philosophical Magazine. 1955 ; 46 : 199-221.
9. Womersley, J.R.. The mathematical analysis

- of the arterial circulation in a state of oscillatory motion, Wright Air Development Center. Technical Report TR. 1957 : 56-614.
10. Womersley, J.R.. Oscillatory flow in arteries : The constrained elastic tube as a model of arterial flow and pulse transmission. *Physics in Medicine and Biology*. 1957 ; 2 : 178-87.
 11. Womersley, J.R.. Oscillatory flow in arteries : The reflection of the pulse wave at junctions and rigid inserts in the arterial system. *Physics in Medicine and Biology*. 1958 ; 2 : 313-23.
 12. Westerhof, N., Bosman, F., De Vries, C.J. et al. Analog studies of the human systemic arterial tree. *Journal of Biomechanics*. 1969 ; 2 : 121-43.
 13. Avolio, A.P.. Multi-branched model of the human arterial system. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 1980 ; 18 : 709-18.
 14. 박영배, 최용태. 豫後 관찰방법에 관한 문헌적 고찰. *대한한의학회지*. 1984 ; 5(1) : 35-8.
 15. 이호재, 김근이, 박연순, 박영배, 허웅. 인영 촌구 대비맥 진단법에 관한 연구. *대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집(의용전자 및 생체공학분야)*. 1992 ; 15(1) : 424-8.
 16. 이호재, 박영배, 허웅. 인영 촌구 대비맥법을 이용한 맥 진단 시스템 구현. *대한의용생체공학회지*. 1993 ; 14(1) : 73-80.
 17. 김무신, 조명래, 박영배. 기구 인영맥의 진단을 통한 내상외감 병기에 대한 문헌적 고찰. *대한침구학회지*. 2001 ; 18(4) : 161-77.
 18. 조명래, 김무신, 유충열, 최찬현, 장경선, 소철호, 박영배. 인영 기구 비교맥법의 정량화에 관한 연구. *대한침구학회지*. 2002 ; 19(2) : 149-63.
 19. Shin, S.H., Park, Y.B. et al. Multibody dynamics in arterial system. Seoul, The second Asian Conference on Multibody Dynamics. 2004.