

급성 동정맥루를 포함하는 인체 심혈관계의 혈류역학적 거동에 관한 수치 해석적 연구

변수영¹ · 손정락² · 심은보³ · 노승탁²

서울대학교 대학원 기계항공공학부¹, 서울대학교 기계항공공학부², 강원대학교 기계메카트로닉스공학부³
(2003년 3월 7일 접수, 2003년 8월 20일 채택)

Computational Study on the Hemodynamic Behaviors of the Human Cardiovascular System with an Acute Arteriovenous Fistula

Su Young Byun¹, Jeong L. Sohn², Eun Bo Shim³ and Sung Tack Ro²

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School, Seoul National University¹,
School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University²,
School of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University³

(Received March 7, 2003. Accepted August 20, 2003)

요약 : 선천적 혹은 후천적인 이유로 인하여 인체 특정 부위의 정맥과 동맥이 서로 관통하여 동맥계의 혈류가 말초 혈관계를 우회하여 정맥계로 흐르게 되는 동정맥루는 인체 심혈관계의 혈류 역학적 거동에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 lumped parameter 모델을 기반으로 하는 수치 해석 방법을 사용하여 우측 하지에 위치한 급성 동정맥루가 전체 심혈관계에 미치는 영향을 해석적으로 고찰하였다. 이를 위하여 동정맥루가 포함된 인체 심혈관계를 전기 회로 유사계로 구성하였으며, 부위별 혈압과 관련된 상미분 연립 방정식을 4차의 Runge-Kutta 방법으로 풀어서 시간에 따른 혈류 역학적 변수들을 구하였다. 이때 급성 동정맥루의 생성에 따른 혈류 역학적 보상작용을 분석하기 위하여 arterial baroreflex 제어계를 모델에 포함하였다.

Abstract : Blood in congenital or acquired AV fistula(arteriovenous fistula) flows from arteries directly to veins, detouring peripheral micro-circulation. This makes a great effect on the hemodynamics of human cardiovascular system. In this study, a computational method using lumped parameter model was proposed to simulate the cardiovascular hemodynamics of patients with acute AV fistula. The cardiovascular system model with a fistula compartment in left lower limb was built using 17 standard lumped compartments. Using fourth order Runge-Kutta method, we solved numerically the unsteady linear set of the ordinary differential equations resulting from application of Kirchhoff's law to the lumped parameter hemodynamic model. The baroreceptor reflex system was implemented to explain the auto-regulation effect of the cardiovascular system with acute AV fistula.

Key words : Hemodynamic simulation, AV fistula, Baroreflex, Lumped parameter model

서 론

인체의 모세순환계는 동맥계와 정맥계를 이어주면서 세포로

산소와 영양분을 공급해 주며, 대사 후 물질을 수거하여 정맥으로 이송시키는 역할을 담당한다. 심혈관계(cardiovascular system) 중 일부 영역에서 혈관기형이나 동맥파열 등으로 인하여 혈류가 정상적인 모세순환과정을 거치지 않고 동맥에서 정맥으로 직접으로 흐르는 현상을 동정맥루(arteriovenous fistula)라고 한다. 이 병증은 오랜 치료의 역사를 가지지만 외과적 수술로 인한 완치율은 그리 높은 편은 아니다. 동정맥루에 의한 말초 혈관의 혈류부족, 정맥계의 고혈압 및 과다 출혈

통신저자 : 손정락, (151-742) 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1번지
서울대학교 기계항공공학부

Tel. 02)880-7434, Fax. 02-889-6205

E-mail. jlsohn@snu.ac.kr

현상은 결국 사지의 절단 등으로 이어지기까지 하며, 심장 부하의 과다로 인하여 사망에 이르기도 한다[1].

동정맥루는 일반적으로 선천적(congenital) 동정맥루와 후천적(acquired) 동정맥루로 구분된다. 선천적 동정맥루는 태생적인 혈관 기형이나 동맥과 정맥의 비정상적 협착 등에 의하여 발생되며, 후천성 동정맥루는 주로 총기나 흉기에 의한 외상(trauma)에 따른 혈관 파열이나 종양(tumor)의 전이(metastasis)에 의해서 병리학적으로 생성된다[2,3]. 최근에는 신장 질환 환자들의 혈액투석을 위한 정맥주사의 용이성을 향상시키기 위하여 인위적인 동정맥루 생성을 위한 기술이 보편화되고 있다[4].

인체 혈관계의 특정 부위에 동정맥루가 존재하게 되면 동정맥루의 기부(基部, proximal) 동맥에서의 일정 혈류량이 말초순환계를 거치지 않고 기부 정맥으로 직접 순환되게 되는데, 이에 따라 동정맥루 기부에서의 동맥 혈압은 감소하고 정맥의 혈압은 상승하게 된다. 이러한 현상들은 동정맥루 말단(末端, distal)에서의 동맥과 정맥에서의 혈류 특성을 변화시키고, 말단에 연결된 모세순환계에서의 혈류량을 감소하게 만든다. 이와 같은 동정맥루에 의한 심혈관계의 비정상적인 혈류 유동 현상은 인체의 자율 조정 기능에 의한 보상(compensation) 작용에 의하여 정상적인 상태로 환원될 수 있다. 그 중에서도 동맥 혈압의 감소는 심장에서의 심박출량의 증가 등에 의한 보상작용에 의하여 정상 혈압으로 돌아가게 되며, 정맥에서의 혈압의 상승은 기부정맥에서 증가된 혈류량이 인체 내의 다른 정맥계로 분산되거나 동정맥루를 우회하는 우회 정맥계(collateral vein)에 의해서 보정되게 된다. 그리고 모세순환계에서의 부족 혈류량은 동정맥루의 상류 동맥으로부터 동정맥루를 우회하는 우회 동맥계(collateral artery)에 의해서 추가적으로 보충된다. 그러나 이러한 자율 조정 기능은 동정맥루의 상태에 따라서는 그 기능을 상실하게 되어 심각한 부작용을 수반하게 된다. 예를 들어 동정맥루에서의 관통부위가 클 경우 동맥으로부터 정맥으로의 과다한 혈류로 인한 동맥에서의 부족한 혈류량을 충당하기 위한 심박출량의 증가는 심혈압의 지속적인 증가와 함께 심장 부하를 증가시킴으로써 심장 기능의 장애를 유발시킴으로써 환자를 사망에 이르기도 한다. 뿐만 아니라, 경우에 따라서는 이러한 자율 조정 기능의 부작용으로 인하여 동정맥루 주위 혈관의 형상이 기형적으로 변형되고 관련 혈관들의 기존 기능을 약화시킴으로써 장기적으로 인체의 전체 심혈관계에 비정상적인 상황을 과급시키는 결과를 가져오게 된다. 이와 같은 동정맥루와 그에 따른 보상 작용에 따른 각종 부작용의 원인은 동정맥루에 의한 심혈관계에서의 혈류역학적 왜곡현상과 밀접한 관련이 있음을 짐작할 수 있다. 따라서 동정맥루의 존재 여부가 인체 심혈관계에 미치는 영향을 혈류역학적 관점에서 체계적으로 분석하여 그 과급효과를 미리 예측할 수 있으면 동정맥루와 관련된 각종 현상을 규명하는데 크게 기여할 수 있을 것이다.

동정맥루가 인체의 심혈관계에 미치는 영향을 혈류역학적으로 고찰하기 위해서는 실험적인 방법과 해석적인 방법이 있을

수 있다. 그 중에서도 실험적인 방법은 보다 실제적인 상황에 근접한 조건에서 각종 임상 데이터를 도출할 수 있다는 장점에 불구하고 직접 인체를 대상으로 하는 실험 연구 수행의 한계로 인한 각종 제약 조건들을 극복해야 하는 단점이 있을 수 있다. 반면에 해석적인 방법은 실제적인 환경 모사에 대한 한계가 있음에도 불구하고 각종 변수들을 변화시켜 가면서 여러 가지 상황에 따른 다양한 결과들의 분석이 가능하여 실험적 연구를 보완할 수 있는 장점이 있다. 특히 최근 들어 전산 유체역학(computational fluid dynamics)의 혈류역학 분야 적용에 따른 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 가상적 수술 기획(virtual surgery planning) 기법은 심혈관계의 각종 수술이전 단계에 수술에 따른 국부적인 상황 변화에 따른 결과 예측을 가능하게 함으로써 여러 가지 부작용을 사전에 방지하는데 활용될 수 있다[5]. 뿐만 아니라, 심혈관계의 특정 부위에서의 국부적인 혈류역학적 현상을 파악하는데 국한되는 전산유체역학적 기법과는 달리 심혈관계의 각종 부위를 개괄적으로 모델링하여 전체 심혈관계의 혈류역학적 특성을 모사할 수 있는 lumped parameter 방법을 응용할 경우 심혈관계의 특정 부위에서의 현상이 전체 심혈관계에 미치는 과급효과를 분석할 수 있다 [6-8].

본 연구에서는 외상(trauma)에 의하여 인체의 우측 하지에 급성(acute) 동정맥루가 발생하였을 경우 이로 인한 심혈관계의 혈류역학적 변화를 lumped parameter 방법을 이용하여 해석적으로 분석하였다. 여기서 급성(acute)이란 만성(chronic)과 상반된 개념으로 동정맥루가 생성되고 난 후 단기간 내의 상황을 의미하며, 생리학적으로는 우회(collateral) 동맥 및 정맥계로 인한 보상작용이 시작되기 이전의 단계로 동정맥루를 통과하는 동맥 혈류량으로 인한 혈류역학적 변화가 단기적 자율 조정기능(short-term autoregulation)만으로 보상되는 상황을 의미한다. 인체 심혈관계의 단기적 자율조정기능에는 baroreflex system, cardiopulmonary mechanism 등과 같은 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 그 중에서도 가장 주된 역할을 하는 것으로 알려진 baroreflex system만을 적용하기로 한다[9].

동정맥루가 포함된 심혈관계의 혈류역학적 모델

1. Lumped parameter model

lumped parameter model을 이용한 인체 심혈관계의 혈류역학적 모델링과 관련된 연구는 지난 수십 년 동안 지속적으로 진행되어 왔으며, 최근 들어 심혈관계의 각종 생리학적 및 병리학적인 현상 규명에 적용되고 있다[10-13]. lumped parameter model은 전체 심혈관계를 필요에 따라 몇 가지의 대표적인 요소들로 구성하고 각 부위 사이를 흐르는 혈류 유동을 관성의 영향이 무시된 비압축성 Poiseuille 맥동 유동으로 가정한다. 이때 각 부위의 혈류량과 혈압과의 관계를 전기회로(electric circuit) 형태로 모사하여 해석적으로 분석한다. 혈류 유량과 혈압과의 관계는 점성유동으로 인한 혈관내의 혈류 저항에 해당하는 전기적 저항(resistance)인 R 을 활용하면 다음과

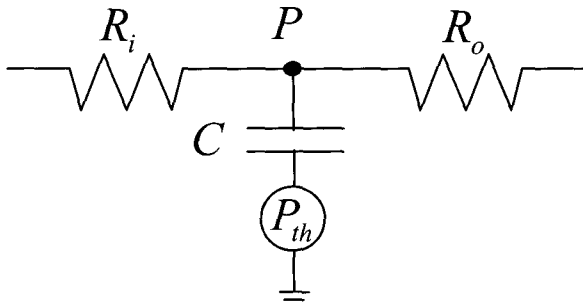


Fig. 1. Electric components of each compartment in the hemodynamic model of the human cardiovascular system

같이 표현할 수 있다.

$$Q = \Delta P / R \tag{1}$$

식 (1)에서와 같이 심혈관계에서의 혈류 저항 R은 혈압 강하량과 혈류 유량의 비로 표현되는데 일반적으로 혈류 저항의 단위로는 PRU (Peripheral Resistance Unit, mmHg · s/ml)를 주로 사용한다[6]. 또한, 심혈관계를 구성하고 있는 각 요소들은 탄성체로써 혈압에 따라 체적이 변하게 되는데, 이를 구성 요소의 탄성도(elastance)의 역수에 해당하는 정전용량(capacitance) C로 표현한다. 아울러 혈관은 혈액 저장고로서의 역할을 하며, 이를 표시하기 위하여 ZPFV(Zero Pressure Filling Volume, 혈관의 transmural pressure가 0인 경우의 체적)를 도입한다. 인체의 경우 ZPFV는 주로 정맥 부분에서 가장 큰데, 이는 정맥이 우리 몸 혈액의 주된 저장고 역할을 한다는 것을 의미한다. 그림 1에서 표시된 것과 같은 심혈관계 구성요소들에 대하여 식 (1)의 유량-압력 관계식 및 회로 절점에서의 Kirchhoff 법칙을 적용시키면 각 절점에서의 혈압에 관한 다음과 같은 연립 상미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dP}{dt} = AP + b \tag{2}$$

여기에서 P는 각 부위에서의 압력값들의 벡터이고, A는 각 부위의 상관성을 표현하는 매트릭스, b는 입력 벡터(forcing vector)를 의미한다. 위의 관계식들을 활용한 lumped parameter model을 심혈관계의 혈류 역학적 특성을 모사하는데 활용하기 위해서는 심혈관계 구성 요소들에서의 혈류저항, 정전 용량 및 ZPFV에 대한 적절한 값들을 선정하여야 한다. 본 연구에서는 심은보 등[12]에 기술된 71-75kg의 남성을 기준으로 한 기존의 임상 및 이론적 데이터를 활용하였다.

2. 동정맥류가 포함된 심혈관계의 전기회로 사상도

그림 2는 우측 하지에 위치한 동정맥류가 전체 심혈관계에

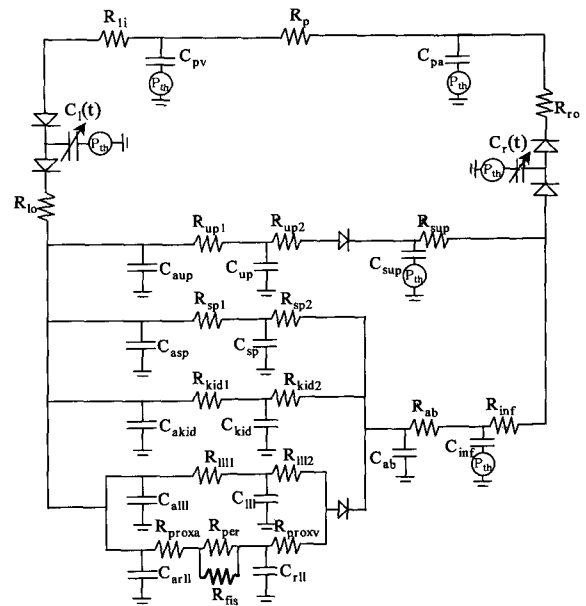


Fig. 2. Circulation diagram of the human cardiovascular system with a arteriovenous fistula at the lower right limb

미치는 영향을 혈류역학적으로 고찰하기 위하여 위에서 기술한 lumped parameter model에 기반을 둔 전기회로 사상도를 나타내고 있다. 전체 심혈관계는 체순환계와 폐순환계로 나누었고, 체순환계는 상지부와 하지부, 신장 순환계와 내장 순환계로 세분하였다. 하지부는 다시 우측과 좌측으로 나누었고, 그 중 우측에 동정맥류가 발생한 것으로 설정하였다. 즉 그림 2에서 나타난 하첨자 1은 좌심실, r은 우심실, pa는 폐동맥, pv는 폐정맥, up는 상지부(upper body), sp는 내장부(splanchnic limb), kid는 신장부(kidney), sup는 superior vena cavae, inf는 inferior vena cavae, ab는 abdominal vena cavae, 하첨자 III는 좌측 하지부(left lower limb), 하첨자 rll은 우측 하지부(right lower limb)를 의미한다. 동맥의 경우 정맥과 구별하기 위해서 정맥 하첨자 앞에 a를 붙였다. Pth는 흉곽의 압력(thoracic pressure)을 의미한다. 우측 하지에 발생한 동정맥류를 모사하기 위해서 동맥과 정맥 사이에 말초 혈관 저항(Rper)과 병렬로 별도의 동정맥류 혈관저항(Rfis)을 상정하였다. 따라서, 우측 하지의 동정맥류는 이 부위 혈관의 혈류 저항으로 표현되며, 이 값이 전체 심혈관계의 구성을 나타내는 식(2)와 같은 연립 상미분 방정식을 통해서 전체 심혈관계의 혈류역학적 특성에 영향을 미치게 된다.

3. Arterial Baroreflex 제어에 의한 자율 조절 기능

인체의 심혈관계는 각종 자율 신경계의 작동에 의해 혈압의 변동 또는 혈액 체적의 변화 등에 적절히 대응할 수 있다. 심혈관계와 관련된 자율 조절 기능으로서서는 경동맥 부위에 분포해 있는 receptor로부터 감지된 동맥 혈압과 관련된 정보를 이용하여 전체 혈압을 조절하는 arterial baroreflex 제어[9], 우심방과 폐동맥에 분포된 receptor에 의해 감지된 정보로부터

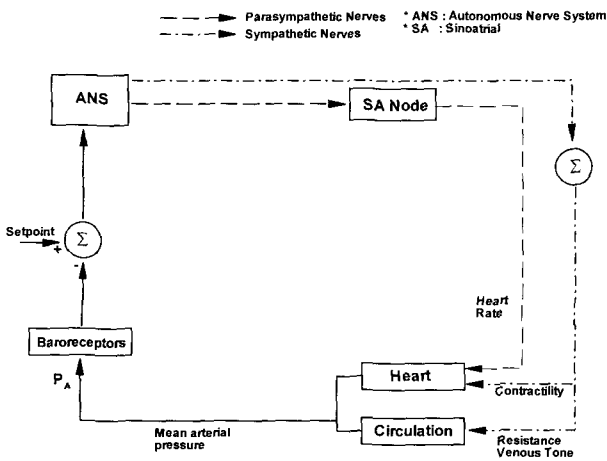


Fig. 3. The role of arterial baroreflex control system in the hemodynamic model of the human cardiovascular system

정맥 혈류량을 제어하는 cardiopulmonary reflex 제어계[14], 그리고 심실에 위치한 chemoreceptor에 의한 혈류량과 관련된 정보를 이용하여 전체 혈류량을 제어하는 Bezold-Jarisch reflex[15] 등이 있다. 그러나 이러한 제어기능 중에서 가장 직접적이고, 빠르게 순환계를 제어하는 기능을 가진 것은 baroreflex system으로 알려져 있다. 그 이외의 나머지 제어계에 의한 것들은 일반적으로 심혈관계에 대한 직접적인 영향이 떨어질 뿐 아니라, 아직도 임상적인 자료 및 이론 등이 불확실한 연유로 본 연구의 모델에서는 도입하지 않았다.

본 연구에서는 단기적 자율 조절 기능에 해당하는 arterial baroreflex 제어계만을 채택하여 급성 동정맥루에 의한 보상작용을 고찰하기로 한다. 그림 3에서 경동맥의 압력을 일정하게 유지하기 위해서 자율 신경계를 통해 맥박수, 심장의 수축성, 혈류저항 등의 요소들이 되먹임 제어되는 것을 나타내었고, 또한 그 과정을 식 (3)으로 표현하였다. $I_i(t)$ 는 신경 자극에 영향을 받는 맥박수, 심수축성 등의 혈류역학적 변수를 시간의 함수로 나타낸 것이며, $I_{i,0}$ 는 기준 상태값이다. 자율 신경계는 경동맥압 (P_a)과 기준혈압 (P_{ref})과 차가 발생하게 되면 아래의 식(4)와 같은 유효 압력차에 비례하여 교감 신경과 부교감 신경을 자극하는데, 이 때 현재의 신호 뿐만 아니라 식(3)과 같이 과거 30초 동안의 유효 압력차 이력을 Berger 등[16]이 제시한 부교감 및 교감 신경에 대한 반응함수 ($p(k)$, $s(k)$)를 이용한 convolution 적분을 통하여 혈류역학적 변수를 제어하게 된다. 여기서, α_i 와 β_i 는 부교감 및 교감 신경계의 gain값을 각각 나타낸다[17,18,19].

$$I_i(t) = I_{i,0} + \int_0^{30} (\alpha_i \cdot p(k) + \beta_i \cdot s(k)) P_e(t-k) dk \quad (3)$$

$$P_e = 18 \tan^{-1} \left(\frac{P_a - P_{ref}}{18} \right) \quad (4)$$

따라서 그림 2와 같이 우측 하지에 위치한 동정맥루가 포함된 인체 심혈관계의 혈류역학적인 거동을 식(2)과 같은 혈압을 나타내는 연립 상미분 방정식과 혈압의 제어와 관련된 arterial baroreflex 제어계(식(3)~(4))를 수치해석을 이용한 전산 시뮬레이션을 수행하면 급성 동정맥루로 인한 인체의 혈류역학적 영향과 그에 따른 보상작용을 해석적으로 고찰할 수 있다.

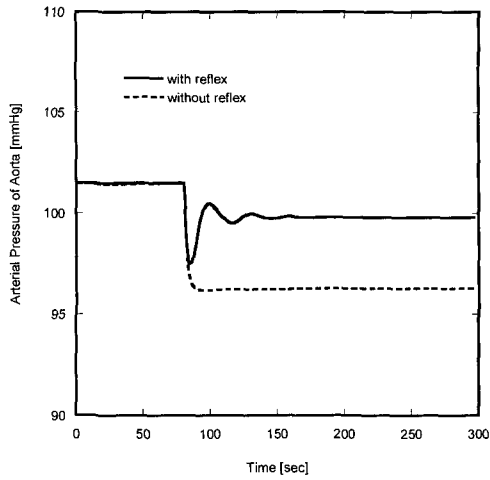
동정맥루가 포함된 심혈관계 거동의 해석 결과

1. Arterial baroreflex 제어계의 영향

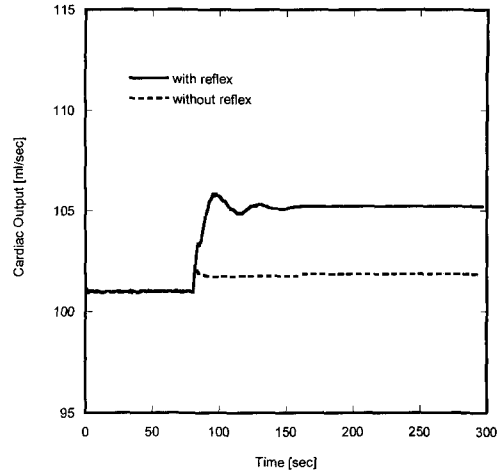
급성 동정맥루의 보상작용을 본격적으로 고찰하기에 앞서 단기적 자율 조절기능에 해당되는 arterial baroreflex 제어계의 기능을 확인하기 위하여 정상인의 우측하지에 순간적으로 동정맥루가 발생되었을 경우를 먼저 고찰하였다. 그림 4는 정상인의 심혈관계에 갑자기 동정맥루를 발생시켰을 때의 혈류역학적 변수, 즉, 대동맥의 혈압과 심박출량 및 심박수의 변화를 각 심주기마다 시간 평균하여 나타낸 것이다. 모든 혈류역학적 변수들은 제어계가 작동하지 않을 경우에는 동정맥루가 발생한 상태에서 더 이상의 변화가 없지만, 제어계가 작동할 경우 일정 시간의 천이과정(transient state)를 거쳐 동정맥루가 발생하기 전의 정상상태 상황으로 보상되는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 동맥 혈압(그림 4(a))은 동정맥루가 발생하면 급격하게 떨어지는데 제어계에 의한 보상작용으로 인하여 상당 수준으로 회복되는 결과를 보여준다. 동정맥루가 생긴 시점에서는 일시적으로 혈류저항의 감소와 동맥 혈압의 감소가 발생한다. 이 때, 혈압이 정상인의 압력 보다 떨어지면서 맥박수, 심장 수축성 및 혈류 저항의 증가의 원인으로 작용하게 된다. 이러한 보상 작용으로 혈압이 상승하면 다시 정상인의 혈압과의 차가 적어져서 혈압 상승이 둔화되어 평형 혈압은 정상 혈압과 동정맥루가 생긴 시점의 혈압 사이에서 결정이 된다. 심박출량은 그림 4(b)와 같이 동정맥루가 발생하면 증가하는 현상을 보이고 있는데, 이는 동정맥루가 생성된 부위에서는 동맥에서 혈액이 말초혈관을 통하지 않고 바로 정맥으로 흐르므로 인해서 정상인 보다 상대적으로 피의 순환 속도가 빨라졌기 때문이다. 뿐만 아니라, 제어계에 의한 보상작용은 맥박수를 증가시켜(그림 4(c)) 혈류량을 더욱 증가시킴을 보여주고 있다.

2. 동정맥루 저항의 영향

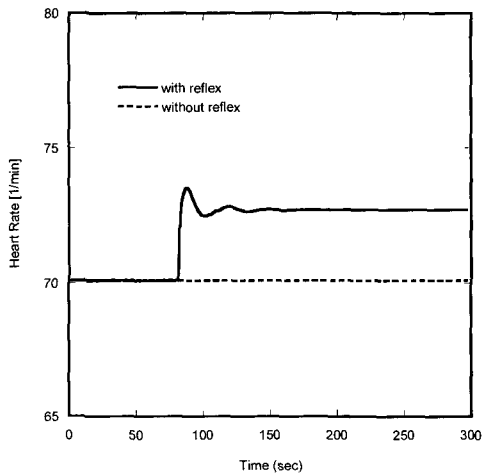
동정맥루의 정량적 크기는 동정맥루 부위의 동맥과 정맥의 관통 면적의 직경으로 나타낼 수 있다. 동정맥루가 클 경우에는 관통 직경이 상대적으로 크기 때문에 관통 혈류 유량이 커지고 식 (1)과 같이 동일한 혈압 조건에서는 저항이 작은 경우에 해당된다. 반면에 동정맥루 부위의 관통직경이 작을 경우에는 관통 혈류 유량이 작아지고, 결과적으로 동정맥루의 혈류 저항이 커지게 된다. 그림 5는 우측 하지 동정맥루의 크기에 대한 영향을 분석하기 위하여 동정맥루의 혈류 저항이 우측 하지 말초 혈관의 혈류 저항의 2배, 1배, 0.5배일 경우의 대동



(a) Arterial pressure of aorta



(b) Cardiac output



(c) Heart rate

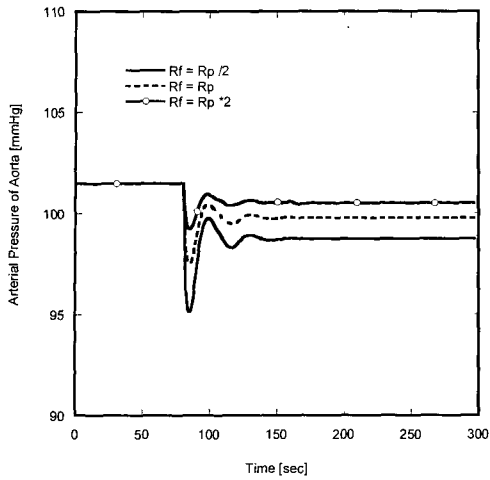
Fig. 4. The role of arterial baroreflex control system on the compensation mechanism due to the acute arteriovenous fistula at the lower right limb of the human cardiovascular system

맥의 혈압과 심박출량 및 심박수의 변화를 각 심주기마다 시간 평균하여 나타낸 것이다. 동정맥루의 혈류저항이 작아질수록 우측 하지의 혈류저항 및 심혈관계 전체의 혈류 저항은 작아지며, 보상작용이 없을 경우에는 동맥압력이 더욱 급하게 떨어지게 된다. 그러나 동정맥루가 인체에 미치는 영향이 커질수록 심박수 및 심장의 수축도가 증가 등의 보상작용은 증가하게 된다. 이와 같은 보상작용은 식(3) 및 식(4)와 같이 정상인 기준압력과 차에 비례하는 것이므로 그림 5(a)에서 정상상태 평균압력은 동정맥루의 저항이 적어질수록 더 낮게 형성되는 것을 알 수 있다. 반면에 그림 5(b)에서와 같이 정상상태 심박출량은 동정맥루 혈류량의 증가에 대한 보상작용의 영향으로 증가하게 된다. 이는 그림 5(c)에서 나타낸 바와 같이 동정맥루에 따른 생리학적 자극에 비례하여 심박수 및 심수축도의

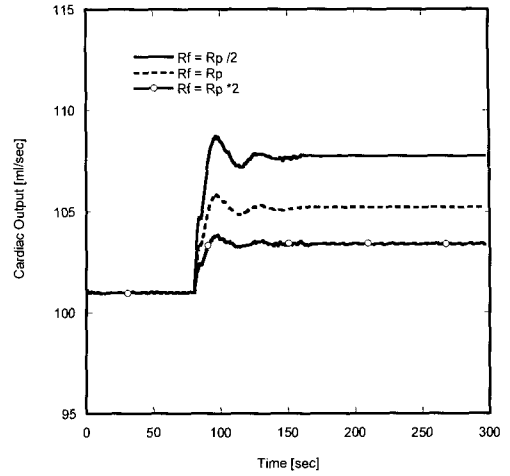
증가와 같은 심혈관계의 제어작용에 의한 것임을 알 수 있다.

3. 급성 동정맥루의 관통 및 막힘에 따른 영향

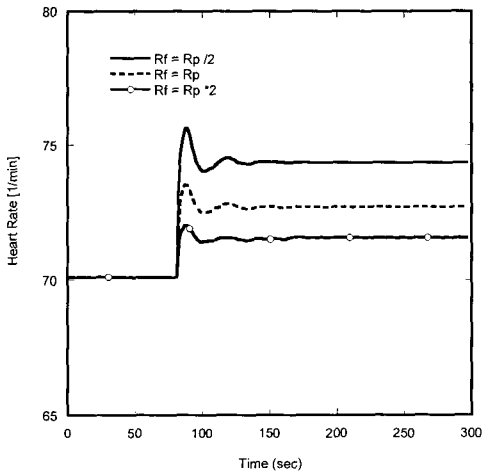
본 연구에서는 급성 동정맥루의 관통 및 막힘 현상이 심혈관계의 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 그림 2와 같이 정상인의 우측 하지에 급성 동정맥루가 발생하였다가 일정 시간(80초)이 지난 후에 동정맥루 관통 혈류가 막혔을 경우를 시뮬레이션 해 보았다. 그림 6은 급성 동정맥루의 관통(80초) 및 막힘(160초)에 따른 시뮬레이션 결과로써 대동맥의 혈압과 심박출량 및 심박수의 변화를 각 심주기마다 시간 평균하여 나타낸 것이다. 그림 6은 급성 동정맥루에 의한 혈류 역학적 거동은 보상작용으로 인하여 천이과정을 거쳐 정상상태로 진행되는 도중 160초에 다시 약간의 과도상태를 지나서 정상인의 상태로 회복하는 과정을 보여주고 있는데, 이는 기존의 임상 실험에서 관찰한 Branham's sign과 유사한 현상임을 확인할 수 있었다[20,21]. 여기서, Branham's sign은 동정맥루를 일시적으로 눌러서 혈류의 흐름을 막게 되면 그동안 심장이 천천히 뛰게 되는 현상을 의미한다[3]. 그림 7은 우측 하지의 급성 동정맥루의 관통 및 막힘이 좌우측 하지의 혈압과 혈류 유량의 변화를 각 심주기(cardiac cycle)마다 시간 평균하여 나타낸 것이다. 동정맥루가 있는 우측 하지의 경우에는 동정맥루가 관통된 상태(80초-160초 구간)에서는 동맥 혈압의 급격한 강하와 정맥 혈압의 상승이 나타나지만, 동정맥루가 없는 좌측 하지에서는 관통 및 막힘 순간에 약간의 압력 변화가 나타남을 알 수 있다(그림 7(a)). 이는 동정맥루의 생성으로 우측하지의 동맥으로 흐르던 혈류 중 많은 양이 말초 혈관계를 거치지 않고 곧바로 정맥으로 흐르면서 우측하지의 혈류 저항이 상대적으로 감소되었기 때문이다. 동정맥루 관통구간에서의 혈류 유량은 그림 7(b)에서와 같이 좌측 하지의 경우 거의 변화가 없는 반면 우측하지로 흐르는 혈류량은 동정맥루의 관통 시 급격하게 상승하게 된다. 이는 동정맥루를 관통하는 혈류 유량의 급격한 증가에 기인함을 알 수 있다. 그러나 우측 하지의 혈류



(a) Arterial pressure of aorta



(b) Cardiac output



(c) Heart rate

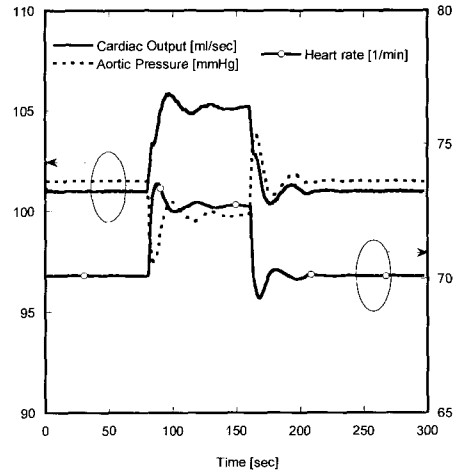


Fig. 6. Impact of the on-off behavior of the acute arteriovenous fistula at the lower right limb on the global hemodynamic phenomena of the human cardiovascular system (Branham's sign)

Fig. 5. Effect of the resistance of the arteriovenous fistula at the lower right limb on the hemodynamic compensation mechanism

량 증가는 동정맥루를 통해 흐르는 혈류량보다 적다. 이는 동정맥루의 발생으로 인하여 우측하지 말단의 혈액부족현상이 나타남을 의미한다.

4. 동정맥루 성장의 영향

동정맥루가 생성되면 인체의 심혈관계는 동맥 및 정맥계의 상호간의 악영향으로 인하여 점차 퇴행적인 과정으로 진행하게 된다. 이 과정에서 동정맥루는 점차 성장하고, 동정맥루 하부의 말초 혈관계는 심각한 혈류부족을 겪게 된다. 이와 같은 동정맥루의 성장이 심혈관계에 미치는 영향을 알아보기 위해서 그림 8과 같이 동정맥루의 크기의 변화에 따른 심혈관계의 혈류 역학적 보상작용에 대해서 고찰하였다. 여기서, 동정맥루의 성장 상태는 동정맥루 관통 혈류 저항의 감소로 표현하여 관

통 혈류 저항의 역수로 나타내었다. 그림 8(a)에서와 같이 동정맥루가 성장함에 따라서 심박수와 심박출량이 증가하며 동맥혈압은 감소함을 알 수 있다. 또한 동정맥루가 있는 우측하지의 동맥 혈압 강하와 정맥 혈압 상승이 더욱 분명하게 나타나는 것을 확인할 수 있다(그림 8(b)). 그림 8(c)에서는 동정맥루의 성장으로 심박출량이 증가하지만 우측하지 외의 다른 부분으로 흐르는 혈류 유량은 오히려 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 우측하지의 혈류저항 감소는 그 외의 부분의 혈류 저항 증가로 인해서 부분적으로 보상작용이 이루어지기 때문이다. 이러한 보상작용은 그림 8(d)에서와 같이 오히려 우측하지로의 혈류 유량을 증가시키게 된다. 그러나 증가된 혈류 유량은 동정맥루를 통해서 빠져나가고 그 후의 말단 혈관으로 혈류량은 감소하게 된다.

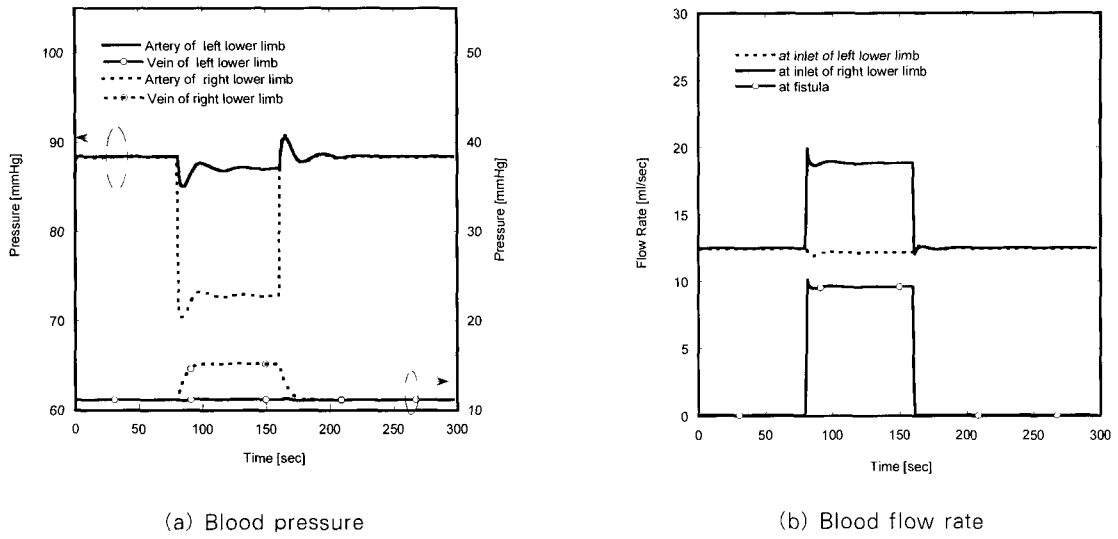


Fig. 7. Impact of the on-off behavior of the acute arteriovenous fistula at the lower right limb on the local hemodynamic phenomena in lower limbs of the human cardiovascular system

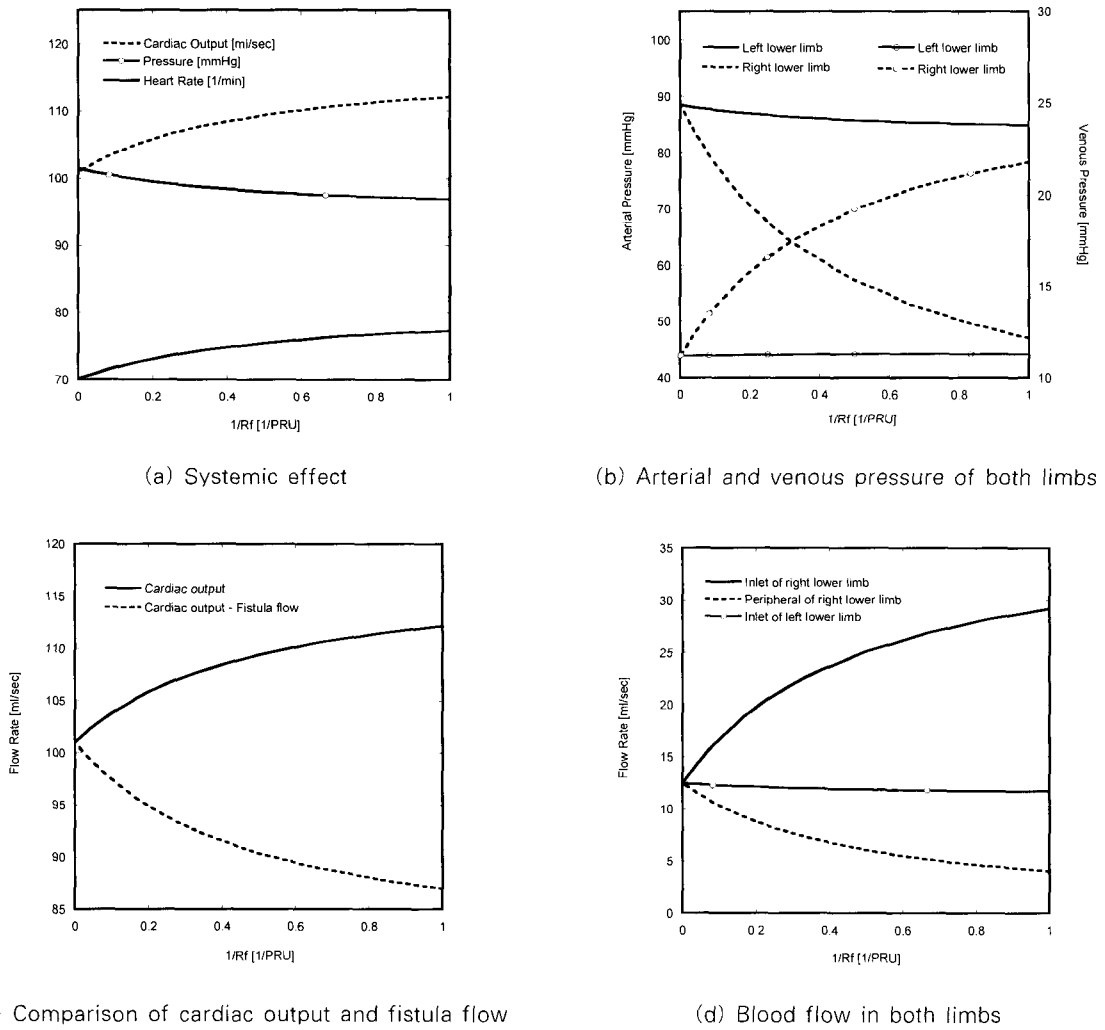


Fig. 8. Compensation characteristics for gradual opening of the acute arteriovenous fistula at the lower right limb

결 론

인체의 특정 부위에 동정맥루가 존재하면 동맥에서의 혈류가 말초 혈관계를 거치지 않고 정맥으로 흐름으로써 전체 심혈관계에 심각한 영향을 미치게 된다. 인체 내부에 존재하는 각종 자율 조정 장치들은 이러한 비정상적인 상황을 정상적인 상황으로 환원시키기 위하여 보상 기능을 작동시키게 된다. 본 연구에서는 동정맥루의 존재와 그에 따른 보상작용이 인체 심혈관계에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 인체의 우측 하지에 급성 동정맥루가 발생하였을 경우 그에 따른 심혈관계의 혈류 역학적 거동을 해석적으로 분석하였다. 이를 위하여 동정맥루를 포함하는 전체 심혈관계는 혈류 역학적 이론에 기반한 lumped parameter model에 따른 전기회로 유사도를 구성하여 각 부위에서의 혈압간의 관계를 연립 상미분 방정식으로 구성하고, 혈압의 단기적 자율 조절 기능에 해당하는 arterial baroreflex 제어계에 의한 보상 기능을 결합하여 수치 해석적으로 분석한 결과 다음과 같은 주요 결론들을 도출하였다.

(1) Arterial baroreflex 제어계의 작동으로 인하여 급성 동정맥루의 발생에 따른 혈압의 강하 현상은 천이과정을 거치면서 동정맥루 발생 이전과 유사한 수준으로 보상되어 감을 확인할 수 있었고 그에 따른 심박출량의 증가도 확인할 수 있었다.

(2) 동정맥루 관통 직경이 클수록, 즉, 동정맥루 부위에서의 혈류 저항이 감소할수록 보상 과정 이후의 대동맥 혈압은 낮아지며, 심박출량은 증가한다.

(3) 우측 하지의 동정맥루가 관통 및 막힘에 따른 혈류 역학적 거동을 시뮬레이션 해 본 결과 혈압, 심박출량 및 심박수 등과 같은 혈류 역학적 변수들이 동정맥루 관통 이후 보상작용으로 인하여 천이과정을 거쳐 정상상태로 진행되는 도중 막힘에 의하여 약간의 과도상태를 지나서 정상인의 상태로 회복하는 과정을 확인할 수 있었다.

(4) 동정맥루가 성장함에 따라서 심박수와 심박출량이 증가하며 동맥 혈압은 감소함을 확인할 수 있었으며, 동정맥루가 있는 우측하지의 동맥 혈압은 강하하고 정맥 혈압은 상승함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 이병봉, "동정맥루의 복합성 혈류학 소견이 그 관리에 미치는 영향", 제2회 한국유체공학학회 학술대회 논문집, pp. 9~10, 2002
- Riles, T.S., "Arteriovenous communications and congenital vascular malformations: Overview", Vascular Surgery, 5th edition, (Edited by Rutherford, R.B.), W.B Saunders Co., pp. 1398~1400, 2000
- Summer, D.S., "Arteriovenous communications and congenital vascular malformations: Hemodynamics and pathophysiology of arteriovenous fistulae", Vascular Surgery, 5th edition, (Edited by Rutherford, R.B.), W.B Saunders Co., pp. 1400~1425, 2000
- Gelabert, H.A. and Freischlag, J.A., "Angioaccess: Hemodialysis access", Vascular Surgery, 5th edition, (Edited by Rutherford, R.B.), W.B Saunders Co., pp. 1466~1477, 2000
- Taylor, C.A., Draney, M.T., Ku, J.P., Parker, D., Steele, B.N., Wang, K., and Zarins, C.K., "Predictive medicine: computational techniques in therapeutic decision-making", Computer Aided Surgery, Vol. 4, pp. 231~247, 1999
- Davis, T.L., Teaching Physiology Through Interactive Simulation of Hemodynamics, Master Thesis of Massachusetts Institute of Technology, 1991
- Noordergraaf, A., Circulatory system dynamics, New York, Academic Press, pp. 105-156, 1978
- Keener, J.P., Sneyd, J., Mathematical physiology, New York, Springer, 1998
- Sagawa, K., "Baroreflex control of the systemic arterial pressure and vascular bed., in Handbook of Physiology, Section 2: The Cardiovascular System," Vol III, Berne, R.M., Editor. American Physiological Society: Bethesda, MD. pp. 453-496, 1983
- Heldt, T., E.B. Shim, E.B., Kamm, R.D., and Mark, R.G., "Computational modeling of cardiovascular response to orthostatic stress", Journal of Applied Physiology, Vol. 92, pp.1239~1254, 2002
- Shim E.B., Youn C.H., Heldt T., Kamm, R.D. and Mark, R.G., "Computational Modeling of the Cardiovascular System after Fontan Procedure", Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2526, pp. 105-114, 2002
- 심은보, 정찬일, 최한고, "단기적 자율조절기능을 포함하는 심혈관계 혈류역학 모델링에 관한 수치적 연구", 대한의용생체공학회 논문집, 제 22 권, 제 5 호, pp.393-402, 2001
- Hademenos, G.J. and Massoud, T.F., "Risk of intracranial arteriovenous malformation rupture due to venous drainage impairment", Stroke, Vol.27, No.6, pp.1072-1083, 1996
- Melchior, F.M., Srinivasan, R.S., and Charles, J.B., "Mathematical modeling of human cardiovascular system for simulation of orthostatic response," American Journal of Physiology, Vol. 262, pp. H1920-33, 1992
- Aviado, D.M. and Guevara Aviado D., "The Bezold-Jarisch reflex. A historical perspective of cardiopulmonary reflexes", Annual New York Academic Science, Vol. 940, pp. 48-58, 2001

16. Berger, R.D., Saul, J.P. and Cohen, R.J., "*Transfer function analysis of autonomic regulation-I. Canine atrial rate response*", American Journal of Physiology, Vol. 256, pp. H142-H152, 1989
17. Deboer, R.W., "*Hemodynamic fluctuations and baro-reflex sensitivity in humans: A beat-to-beat model*", American Journal of Physiology, Vol. 263, No. 22, pp. H680-H689, 1987
18. Melchior, F.M., Srinivasan, R.S. and Charles, J.B., "*Mathematical modeling of human cardiovascular system for simulation of orthostatic response*", American Journal of Physiology, Vol. 262, pp. H1920-H1933, 1992
19. Shoukas, A.A. and Brunner, M.C., "*Epinephrine and the carotid sinus reflex: influence on capacitive and resistive properties of the total systemic vascular bed of the dog*", Circ. Res., Vol. 47, pp.249-257, 1980
20. Nakano, J., and Schryver, C.D., "*Effect of arterio-venous fistula on systemic and poulmonary circulations*", American Journal of Physiology, Vol. 207, No. 6, pp. 1319-1324, 1964
21. Nickerson, J.L., Elkin, D.C. and Warren, J.V., "*The effect of temporary occlusion of arteriovenous fistulas on heart rate, stroke volume, and cardiac output*", Journal of Clinical Investigation, Vol.30, No.2, pp.215-219, 1951