저체온 심폐우회로를 채용한 심장수술에서 요골 동맥압 파형분석을 이용한 심박출지수는 신뢰할 만한가?

울산대학교 의과대학 강릉아산병원 마취통증의학교실, *국립의료원 마취통증의학과,
†건국대학교 의학전문대학원 건국대학교병원 마취통증의학교실

정 화 성 · 김 창 원* · 김 태 업†

Is radial artery pressure waveform derived cardiac index is reliable during cardiac surgery with hypothermic cardiopulmonary bypass?

Hwa Sung Jung, Chang-Won Kim*, and Tae-Yop Kim†

Department of Anesthesiology and Pain Medicine, Asan Medical Center, College of Medicine, University of Ulsan, Gangneung,
Department of Anesthesiology and Pain Medicine, *National Medical Center, †Konkuk University Hospital,
Konkuk University School of Medicine, Seoul, Korea

Background: Discrepancy of central-peripheral arterial pressure after cardiopulmonary bypass may affect the reliability of arterial pressure waveform derived cardiac index (APCI) monitoring.

Methods: In 15 elective cardiac surgeries employing moderate hypothermic cardiopulmonary bypass (CPB), APCI from radial arterial cannula and pulmonary artery catheter derived cardiac index from thermodilution method (PACI) were measured 1) after anesthesia induction (T1), 2) before CPB (T2), 3) immediately after CPB (T3) and 4) 1 hour after CPB (T4). APCI and PACI were analyzed by using the Bland-Altman analysis.

Results: Biases of APCI and PACI at T1, T2, T3 and T4 were 0.093 L/min/m², -0.053 L/min/m², 0.485 L/min/m² and -0.09 L/min/m², respectively. The limits of agreement (2 SD) at T1, T2, T3 and T4 were from -2.285 to 2.471 L/min/m², -2.475 to 2.369 L/min/m², -2.255 to 3.225 L/min/m² and -2.609 to 2.423 L/min/m², respectively. Bias of APCI and PACI during entire period (T1-T4) was 0.095 L/min/m² and 2 SD was from -2.387 to 2.557 L/min/m². However, mean error % (2 SD/mean) of APCI at T1, T2, T3, and T4 were greater than 30%.

Conclusions: Our results were not able to show that APCI measured from radial artery is comparable to PACI for hemodynamic monitoring during cardiac surgery employing moderate hypothermic CPB. Considering the limitations of PACI as a gold standard of hemodynamic monitoring in a certain clinical circumstance, further investigation employing other monitoring method than PACI may be followed to get more definitive conclusion. (Korean J Anesthesiol 2009; 57: 44~9)

Key Words: Arterial pressure waveform derived cardiac output, Cardiopulmonary bypass, Thermodilution cardiac output.

서 론

심장 수술에서 심장의 전부하, 후부하 그리고 수축력 변화의 감시는 매우 중요한데, 여러 방법들 중에서도 열선센서와 광선센서를 갖는 폐동맥카테터(pulmonary artery catheter, PAC)를 삽입하여 열희석법에 의한 심박출지수(cardiac index, PACI) 감시가 심박출량 감시의 기준(gold standard)으로 여겨지고 있다. 하지만 PACI 감시는 폐동맥 카테터를 폐동맥까지 위치시켜야 하므로 유도자(introducer)의 중심정맥 도관이 필수적으로 요구되는 침습적인 방법으로서 폐동맥 카테터 말단을 폐동맥에 도달시키는 과정에서 발생 가능한 손상이

Received: April 6, 2009.

Accepted: May 19, 2009.

Corresponding author: Tae-Yop Kim, M.D., Department of Anesthesiology and Pain Medicine, Konkuk University Hospital, Konkuk University School of Medicine, Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-729, Korea. Tel: 82-2-2030-5445, Fax: 82-2-2030-5449, E-mail: pondkim@unitel.co.kr

Copyright © Korean Society of Anesthesiologists, 2009

© This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

나 그에 따른 합병증이 수반된다[1-3]. 특히 심전도 장애 환자에서 폐동맥 카테터 전진 시 심장 자극으로 인해 부정맥이 발생되거나 전도 장애가 심화되면 매우 치명적인 결과를 초래할 수 있어서 사용에 제한이 따른다. 최근 소개된 동맥압 파형(arterial pulse contour)을 분석하여 연속적으로 심박출지수(arterial pressure waveform derived cardiac index, APCI)를 감시하는 방법은 말초 동맥에 거치된 동맥압 감시 도관에 간단한 센서를 추가하는 것만으로 심박출지수 감시가 가능한 비교적 덜 침습적인 방법으로서 폐동맥 카테터 삽입에 따른 위험 및 합병증을 피할 수 있다[4-6]. 그러므로 폐동맥 카테터 삽입이 곤란한 심장 수술 환자들에서 수술 중 혈액학 및 마취 관리에 APCI 감시가 이용되기도 하지만 [7,8], 심장 수술에서 저체온 심폐우회술(cardiopulmonary bypass) 가동 직후 말초와 중심 동맥 사이에 흔히 발생하는 압력차(discrepancy)는 요골 동맥 파형으로 측정되는 APCI의 신뢰도에 영향을 미칠 수 있다[9-11].

저자들은 요골 동맥 파형으로 측정된 APCI 감시가 저체온성 심폐우회술을 가동하는 심장 수술에서도 PACI와 필적할 만하게 신뢰성 있는 심박출지수에 관한 정보를 제공하는지 알아보기 위해 본 연구를 시행하였다.

대상 및 방법

병원윤리위원회 승인을 거쳐, 중등도의 저체온 심폐우회술(직장온도 25–30°C) 가동이 예정된 15명의 정규 심장 수술 환자를 대상으로 하여, 사전에 동의서를 받고 본 연구를 시행하였다(Table 1).

환자가 수술실 도착 즉시 심전도, 혈압, 심박수, 맥박산소포화도, 이중분광지수(bispectral Index, BIS), 뇌 산소포화도 감시를 시작하였다. 마취 유도 전에 요골동맥압 감시 도관에 APCI 감시 센서(FloTrac™, Edward Lifesciences LLC,

USA)와 모니터(Vigileo™, Edward Lifesciences LLC, USA)를 연결하여 침습적 요골동맥압과 APCI 감시를 시작하였고, propofol (목표 효과농도 2.0–2.5 μ g/ml)과 remifentanyl (목표 혈장농도 2.5 ng/ml) 투여를 시작하고 BIS 점수가 감소되기 시작할 때 rocuronium 0.9 mg/kg을 투여하고, 자연속자극을 감시하면서 기관내삽관을 시행하였다. 기관내삽관 후 도뇨관을 삽입하고, 식도와 직장에서 체온 감시를 시작한 다음, 경식도 심장초음파(transesophageal echocardiography, TEE) 탐식자를 삽입하여 TEE 감시를 시작하였다. 폐동맥 카테터(Swan-Ganz CCOmbo™, Edwards Lifesciences LLC, USA) 삽입을 위해 우측 내경정맥에 9.0 Fr. 폐동맥 카테터 도입자(AVA™, Edward Lifesciences LLC, USA)를 거치하고, TEE 보조 하에 말단 풍선(balloon)의 위치를 파악하면서 폐동맥 카테터 말단을 우측 폐동맥에 위치시켰다.

심폐우회로를 가동하여 직장온도가 28°C가 된 후 수술을 시작하였고, 수술 종료 후에는 식도-직장 온도 차가 2°C 이하가 되도록 체온을 재가온 하여 직장온도가 35.5°C 이상으로 상승한 후 심폐우회로 이탈을 시작하였다.

수술 후 환자는 기관내삽관이 된 상태로 정맥내 자가 통증 조절기를 부착한 상태로 조절 호흡하면서 중환자실로 이동되었다.

1) 마취 유도 직후(T1), 2) CPB 도입 직전(T2), 3) CPB 종료 직후(T3), 그리고 4) CPB 종료 1시간 후(T4)에 APCI와 PACI를 측정하고, Bland-Altman plot을 사용하여 분석하였다. Bias (두 측정 방법으로 얻어진 측정값 간 차이의 평균)와, 정확도를 반영하는 일치한도(limit of agreement, $2 \times$ 표준편차)를 분석하여, bias가 일치한도 내에 분포하는지를 알아보고, 아울러 APCI의 평균오차 % (mean error % = $2 \times$ 표준편차/평균값)를 알아보았다.

Fig. 1. APCI and PACI after anesthesia induction are shown in Bland-Altman plot. APCI: arterial pressure waveform derived cardiac index, PACI: pulmonary artery catheter derived cardiac index.

Table 1. Demographic Data

Age (yr)	51.2 $\pm$ 14.3
Sex (M/F)	11/4
BSA (m ²)	1.73 $\pm$ 0.23
CPB time (min)	120.2 $\pm$ 36.9
ACC time (min)	60.7 $\pm$ 22.5
Operation types	
MVR	5
AVR	7
Aorta	3

Values are mean $\pm$ SD or number of the patients. BSA: body surface area, CPB time: duration of applying cardiopulmonary bypass, ACC time: duration of applying aortic cross-clamp, MVR: mitral valve repair or replacement surgery, AVR: aortic valve repair or replacement surgery, Aorta: aortic arch surgery.

결 과

T1에서 APCI와 PACI 두 값의 bias는 0.093 L/min/m^2 , 일치한도는 -2.285 L/min/m^2 부터 2.471 L/min/m^2 까지이었고 (Fig. 1), T2에서 bias는 -0.053 L/min/m^2 , 일치한도는 -2.475 L/min/m^2 부터 2.369 L/min/m^2 까지이었으며 (Fig. 2), T3에서 bias는 0.485 L/min/m^2 , 일치한도는 -2.255 L/min/m^2 부터 3.225 L/min/m^2 까지이었으며 (Fig. 3) 그리고 T4에서 bias는 -0.093 L/min/m^2 , 일치한도는 -2.609 L/min/m^2 부터 2.423 L/min/m^2 까지이었다 (Fig. 4). T1, T2, T3 그리고 T4에서 측정

Fig. 2. APCI and PACI before cardiopulmonary bypass are shown in Bland-Altman plot. APCI: arterial pressure waveform derived cardiac index, PACI: pulmonary artery catheter derived cardiac index.

Fig. 3. APCI and PACI immediately after cardiopulmonary bypass are shown in Bland-Altman plot. APCI: arterial pressure waveform derived cardiac index, PACI: pulmonary artery catheter derived cardiac index.

된 전체 APCI와 PACI의 bias는 0.095 L/min/m^2 , 일치한도는 -2.387 L/min/m^2 부터 2.557 L/min/m^2 까지이었다 (Fig. 5). 하지만 APCI의 평균오차 %가 56.8% (T1), 73.1% (T2), 46.2% (T3) 그리고 38.6% (T4)로서 모두 30%를 초과하였다.

고 찰

비교적 최근에 선보인 APCI 감시 장치는 PAC 거치 없이 CI를 측정하는 것이 가능한데, ‘말초 동맥의 맥박 파형(pulse waveform contour)’에서 맥압(pulse pressure)은 일회 박출량(stroke volume)에 비례하고 대동맥의 유선도와 역비례 한다는 개념을 기본으로 한다[4]. 이는 과거 상당기간 동맥 혈압

Fig. 4. APCI and PACI 1 hour after cardiopulmonary bypass are shown in Bland-Altman plot. APCI: arterial pressure waveform derived cardiac index, PACI: pulmonary artery catheter derived cardiac index.

Fig. 5. APCI and PACI in all study periods are shown in Bland-Altman plot. APCI: arterial pressure waveform derived cardiac index, PACI: pulmonary artery catheter derived cardiac index.

파형을 사용하여 심박출량을 측정할 수 있지 않을까 하는 생각이 파형의 세밀한 부분까지 감지하고 계측할 수 있는 기술적 진보를 통해 비로소 감시 장치로 완성된 것으로 여겨진다[12,13]. APCI는 실제 말초 동맥압 파형으로부터 100 Hz 빈도로 맥박에 대한 정보가 수집되고 각 맥박의 표준편차를 통해 계측 가능한 맥박 파형의 형태가 얻어지고 이를 바탕으로 매 20초마다 심박출량을 자동 계산하여 모니터상에 수치로 나타내어 주는데, 이 장치의 또 다른 장점은 사전에 보정(calibration)이 필요하지 않으면서도 실측된 동맥압을 근거로 정확한 심박출량 감시가 가능하다는 사용의 편리성을 들 수 있다. 게다가 구성 장치는 단지 정보 처리 장치/표시기(Vigileo™)에 연결된 감지기(FloTrac™)이며 준비과정으로는 연령, 신장, 체중과 성별을 입력만이 필요하다. 이처럼 사용과 준비 과정이 간단하므로 심장 수술처럼 혈액학이 매우 빠르게 변화하는 상황에 즉각 적용하는데 간편하다. 아울러 심장수술에서처럼 혈관 내 용적 이동이 현저하여 급속 수액 혈액 주입이 빈번하고, 심폐우회로 가동 및 이탈 동안 급격한 체온변화가 동반되는 상황에서 열회석법이 신뢰도가 감소할 가능성이 높은 점과 폐동맥카테터 삽입에 수반되는 합병증 및 위험도를 고려한다면, 경우에 따라서는 비교적 덜 침습적인 APCI 감시가 더 유용할 수 있다. APCI의 임상적 유용성 및 신뢰성이 어느 정도 확립되어 있는 가운데[14,15], Kim 등도 PAC 삽입이 어려운 심장 수술 환자의 APCI와 더불어 중심정맥 산소포화도($ScvO_2$)를 감시하여 성공적인 마취 관리를 수행한 것을 보고하여서 [8] 폐동맥카테터가 금기인 심장 수술 환자에서도 APCI 감시가 유용한 방법임을 시사하였다.

모든 심장 수술에서 꼭 폐동맥카테터를 삽입해야 하는지에 대한 많은 논란과 더불어, 본 연구처럼 새로 도입되는 혈액학 감시 방법의 유용성 검사의 비교기준으로서 PACI를 이용할 수 밖에 없는지에 대해서는 재고의 여지가 많다. 특히 본 연구에서도 폐동맥 및 우심장 혈액학에 변화를 주는 삼첨판막 질환 및 승모판 질환 환자가 포함되었는데, 이는 CPB 가동 전의 측정된 PACI 정확도를 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 수술로서 교정되지 않은 삼첨판 역류의 경우 심폐우회로 가동 후의 PACI 신뢰도에도 영향을 미칠 수 있다. 그 외에도 상당히 많은 임상 상황이 열회석법으로 측정된 PACI 측정치가 임상적 상황을 정확히 반영하지 못하게 하는데, 특히 혈액학적으로 불안정하거나 상당히 빠른 속도로 혈액이나 수액이 투여되고 있는 상황에서 부정확성이 증가할 수 있다. 그러나, 아직까지 PACI 보다 더 월등하고 신뢰도가 높다고 임상적으로 공인된 혈액학 감시방법이 소개되지 않았다. 본 연구에서 저자들이 연구결과를 바탕으로 APCI의 임상적 유용성에 대한 부정적 결론을 단언하지 못하는 이유도, 두 측정값의 불일치의 원인이 APCI 뿐만 아

Table 2. Arterial Pressure Waveform Derived Cardiac Index, Pulmonary Artery Catheter Derived Cardiac Index and Mean Arterial Blood Pressure at Each Study Period

	MBP (mmHg)	APCI (L/min/m ²)	PACI (L/min/m ²)	P value
T1	77 ± 11	3.10 ± 0.88	3.09 ± 1.05	0.766
T2	73 ± 18	3.23 ± 1.18	2.92 ± 0.91	0.867
T3	75 ± 7	3.12 ± 0.72	3.32 ± 1.14	0.226
T4	80 ± 10	3.21 ± 0.62	3.09 ± 1.05	0.778

Values are mean ± SD. MBP: mean arterial blood pressure, APCI: arterial pressure waveform derived cardiac index, PACI: pulmonary artery catheter derived cardiac index. P: paired t-test, APCI vs. PACI. T1: after anesthesia induction, T2: before cardiopulmonary bypass (CPB), T3: immediately after CPB, T4: 1 hour after CPB.

니라, PACI에 기인하였을 가능성을 완전히 배제할 수 없었기 때문이다.

본 연구 수행기간 전반에 걸친 거시적 관찰에서 환자 마취 관리에 실제로 이용된 APCI나 PACI 측정값이 크게 차이를 보이지 않았고, 실제 각 시기별로 두 측정값들을 paired t-test로 비교한 결과에서도 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 2). 특히 비교적 말초-중심 혈압차가 빈번히 발생하는 심폐우회로 완료 직후나 한 시간 후에도 PACI와 견주어 차이를 보이지 않았으며, PACI에 대한 APCI의 신뢰도를 뒷받침할 만한 두 측정값의 일치한도와 bias 분포도 일치 조건을 만족하여서 전반적으로 차이가 없다고 여겼지만, 표준 오차가 상대적으로 과다했기 때문에, 결국은 APCI가 PACI에 필적 할만한 정도의 신뢰도가 있다는 결론에 도달하지 못했다. 이는 기존 감시 방법과 비교하여 10–20% 미만의 오차를 갖는 유용한 새로운 감시 방법을 검증하기 위해 Blend-Altman plot을 이용하는 경우에는 새 감시방법의 측정값 일치한도와 bias 외에도 평균오차 %가 30% 미만이어야 한다는 Critchley 등의 주장을[16] 결과 해석에 반영하였기 때문이다.

APCI가 신체 어느 부위에서 수집된 동맥 파형을 기본으로 하든지 간에 좌심실에서 발생하여 순간 증가하는 진행성(antegrade) 혈류와 말초에서 반향되는(reflected) 퇴행성 echo 혈류의 조합을 통해 심장 수축과 동맥간의 관계적 특성을 반영하는데, 중심에서 말초로 갈수록 동맥 혈류 폭은 확대되므로 중심과 말초 동맥의 혈류 압력 특성이 변화하는데다가 저체온 CPB를 상당 기간 가동한 후 완전한 체온 상승까지 발생하는 말초-중심 동맥 사이 압력차가 혼란점을 고려하면 본 연구처럼 요골 동맥 파형을 기본으로 측정되는 APCI가 과연 정확한가에 대한 의문은 피하기 어렵다 [9-11]. 본 연구에서 심폐우회로 가동 전후에 APCI 유용성 평가에 영향을 미쳤을 원인으로서는; 1) 특정시기의 측정값들

만 이용하였기 때문에 비교적 장시간인 수술 기간 전체의 측정값들이 반영되지 못한 점, 2) 심내막염에 의한 대동맥 판막 수술 환자 중 중등도 미만이라는 하지만 대동맥 폐쇄 부전증이 동반된 점, 그리고 3) 두 감시장치간의 측정값 생성에 소요되는 시간차가 고려되지 않은 점을 들 수 있었다. 실제 임상에서 측정된 심박출지수의 절대치 보다는 시시각각 변화하는 상대적 측정치의 변화가 중요한 치료지침이 됨을 고려한다면, 본 연구에서처럼 단 몇 차례의 측정치를 비교한 것이 얼마만큼 임상적 의미를 갖는지에 대한 의문을 갖게 한다. 또, 대동맥 폐쇄부전이나 협착과 같은 상황이나 비교적 다양한 혈액학적 변화가 수반되는 수술에서 고용량의 혈관 작용 약제와 양성 변력 제제의 사용은 정확한 APCI 측정을 심각하게 방해할 소지가 있다. 아울러 APCI 감시장치가 혈압 파형을 분석하여 새로운 측정값을 표시해주는데 최소 1분 정도의 간격(지연시간)이 소요되는 반면, PACI는 stat mode를 사용하더라도 측정값 발생에 3-5분 정도의 지연시간이 소모되므로, 다양한 수술적 및 치료적 환경에 따라 역동적으로 혈액학이 수시로 변화하는 심장 수술 환경을 고려한다면, 이러한 시간차이가 서로간 상이한 측정값을 나타내는데 크게 이바지하였을 가능성을 배제할 수 없다. 하지만 이미 APCI 적용에 제한이 되는 좌심실 보조기 가동 환자에서조차도 보조기에서 작용하는 혈류 및 압력이 말초로 갈수록 더욱 커져서 말초 동맥 파형은 상대적으로 과장되더라도, 이러한 말초-중심 압력차 증가가 보조기에 의해 호전된 혈액학을 잘 반영한다는 Vlachopoulos 등의 주장을 고려한다면[17,18], 이미 알려진 APCI의 제한점들에도 불구하고, APCI가 좀더 다양한 임상 환경에서 신뢰 할만하게 혈액학 감시 역할을 수행할 가능성을 시사한다고 하겠다.

결론적으로 중등도의 저체온 CPB를 가동하는 심장 수술 중에 요골동맥에서 측정된 APCI와 PACI 측정값들을 비교한 본 연구에서, 비교적 만족스러운 일치도와 bias에도 불구하고 과도한 평균오차를 보인 결과에 따르자면, APCI가 PACI에 필적하는 혈액학 정보를 제공하는 감시방법이라고 결론 지을 수 없었다. 이미 기술한대로 다양한 임상 현장에서 신뢰할 만한 혈액학적 감시장치로서 부족함이 없다고 보고한 상당수의 연구결과들을 고려한다면, 보다 더 세세하고 강화된 환자 적용뿐 만 아니라, APCI의 비교 기준으로서 PACI보다 더 신뢰성 있는 혈액학 감시 방법을 적용한 추가연구가 필요하리라 여겨진다.

REFERENCES

1. Bossert T, Schmitt DV, Mohr FW. Pulmonary artery rupture-fatal complication of catheter examination (thermodilution catheter). *Z Kardiol* 2000; 89: 54.
2. Abreu AR, Campos MA, Krieger BP. Pulmonary artery rupture induced by a pulmonary artery catheter: a case report and review of the literature. *J Intensive Care Med* 2004; 19: 291-6.
3. Huang L, Elsharydah A, Nawabi A, Cork RC. Entrapment of pulmonary artery catheter in a suture at the inferior vena cava cannulation site. *J Clin Anesth* 2004; 16: 557-9.
4. Boulain T, Achard JM, Teboul JL, Richard C, Perrotin D, Ginies G. Changes in BP induced by passive leg raising predict response to fluid loading in critically ill patients. *Chest* 2002; 121: 1245-52.
5. Williams RR, Wray RB, Tsagaris TJ, Kuida H. Computer estimation of stroke volume from aortic pulse contour in dogs and humans. *Cardiology* 1974; 59: 350-66.
6. English JB, Hodges MR, Sentker C, Johansen R, Stanley TH. Comparison of aortic pulse-wave contour analysis and thermodilution methods of measuring cardiac output during anesthesia in the dog. *Anesthesiology* 1980; 52: 56-61.
7. Edwards JD, Mayall RM. Importance of the sampling site for measurement of mixed venous oxygen saturation in shock. *Crit Care Med* 1998; 26: 1356-60.
8. Kim TY, Kwon WK, Yoon CY, Kim HK, Kim JS, Chee HK. Continuous cardiac output by using arterial pressure waveform analysis and central venous oxygen saturation during cardiac surgery. *Korean J Anesthesiol* 2007; 53: 109-14.
9. Stern DH, Gerson JJ, Allen FB, Parker FB. Can we trust the direct radial artery pressure immediately following cardiopulmonary bypass? *Anesthesiology* 1985; 62: 557-61.
10. Rich GF, Lubanski RE Jr, McLoughlin TM. Differences between aortic and radial artery pressure associated with cardiopulmonary bypass. *Anesthesiology* 1992; 77: 63-6.
11. Gravlee GP, Wong AB, Adkins TG, Case LD, Pauca AL. A comparison of radial, brachial, and aortic pressures after cardiopulmonary bypass. *J Cardiothorac Anesth* 1989; 3: 20-6.
12. Jansen JR, Schreuder JJ, Mulier JP, Smith NT, Settels JJ, Wesseling KH. A comparison of cardiac output derived from the arterial pressure wave against thermodilution in cardiac surgery patients. *Br J Anaesth* 2001; 87: 212-22.
13. Della Rocca G, Costa MG, Coccia C, Pompei L, Di Marco P, Vilardi V, et al. Cardiac output monitoring: aortic transpulmonary thermodilution and pulse contour analysis agree with standard thermodilution methods in patients undergoing lung transplantation. *Can J Anaesth* 2003; 50: 707-11.
14. Söderström S, Nyberg G, O'Rourke MF, Sellgren J, Pontén J. Can a clinically useful aortic pressure wave be derived from a radial pressure wave? *Br J Anaesth* 2002; 88: 481-8.
15. Adji A, Hirata K, Hoegler S, O'Rourke MF. Noninvasive pulse waveform analysis in clinical trials: similarity of two methods for calculating aortic systolic pressure. *Am J Hypertens* 2007; 20: 917-22.
16. Critchley LA, Critchley JA. A meta-analysis of studies using bias and precision statistics to compare cardiac output measurement techniques. *J Clin Monit Comput* 1999; 15: 85-91.
17. Vlachopoulos C, McDonald P, Spratt P, O'Rourke M. Pulse wave

analysis in the assessment of patients with left ventricular assist device. J Heart Lung Transplant 2001; 20: 98-102.

18. Schofield RS, Pierce GL, Nichols WW, Klodell CT, Aranda JM

Jr, Pauly DF, et al. Arterial-wave reflections are increased in heart failure patients with a left-ventricular assist device. Am J Hypertens 2007; 20: 622-8.