

무체외순환관상동맥우회술에서
FloTrac 동맥파형분석(pulse-contour
analysis)과 폐동맥카테터를 이용한
심박출량의 비교

연세대학교 대학원

의학과

유영철

무체외순환관상동맥우회술에서
FloTrac 동맥파형분석(pulse-contour
analysis)과 폐동맥카테터를 이용한
심박출량의 비교

지도교수 김기준

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2008 년 6월

연세대학교 대학원

의학과

유영철

유영철의 석사 학위논문을 인준함

심사위원_____인

심사위원_____인

심사위원_____인

연세대학교 대학원

2008년 6월

감사의 글

본 연구의 계획에서부터 논문의 완성에 이르기까지 따뜻하게 지도해 주신 존경하는 김기준 선생님께 우선 깊은 감사를 드립니다. 또한 연구의 진행 및 논문 작성시 많은 가르침을 주신 곽영란 선생님과 장양수 선생님 그리고 심재광 선생님께 감사드립니다.

또한 자료 수집 및 통계 분석에 도움을 주신 김수환 선생님과 김창석 선생님을 비롯하여 끊임없는 협조와 격려를 보내준 마취통증의학과 선생님들과 의국원 여러분들에게도 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로 항상 사랑으로 이해해 주시고 늘 지켜보아 주신 부모님께도 말로 표현할 수 없는 고마움을 전합니다.

저자 씀

차례

국문요약	1
I. 서론.....	3
II. 대상 및 방법	7
III. 결과	11
IV. 고찰.....	21
V. 결론	27
참고문헌.....	28
영문요약.....	34

그림 차례

Fig. 1 Relationship between percent changes in the mean arterial pressure and STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter.14

Fig. 2 Relationship between percent changes in the mean arterial pressure and cardiac index measured by FloTrac.15

표 차례

Table 1. Demographic data	16
Table 2. Changes in Hemodynamic Variables at Various Time Points.....	17
Table 3. Comparisons between STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter and cardiac index measured by FloTrac	18
Table 4. Comparisons between STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter and cardiac index measured by FloTrac at the points of normal SVRI and MAP	19
Table 5. Comparisons between STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter and cardiac index measured by FloTrac at the points of abnormal SVRI or abnormal MAP	20

국문 요약

무체외순환관상동맥우회술에서 FloTrac 동맥파형분석(pulse-contour analysis)과 폐동맥카테터를 이용한 심박출량의 비교

서론 : 무체외순환관상동맥우회술(Off-pump coronary artery bypass graft surgery, OPCAB) 중에 발생하는 급격한 혈액학의 변화에 대한 적절한 치료를 위하여 심박출량의 지속적인 감시가 필요하다. 본 연구의 목적은 OPCAB 중 심장 거상시와 같이 혈액학이 불안정한 시기에 FloTrac 동맥파형분석(pulse-contour analysis)을 이용하여 측정한 심박출량 (FCI) 을 폐동맥카테터를 이용하여 측정한 심박출량(SCI)과 비교하는 것이다.

대상 및 방법 : OPCAB을 시행 받는 50명의 환자군을 대상으로 마취유도 15분 후(T1), 흉곽과 심내막을 열고 Y-graft 문합 시작 15분 후(T2), 그리고 심장 거상 후 둔각변연지(obtuse marginalis branch) 문합을 위하여 관상동맥 근위부를 결찰하고 절개한 1분(T3)과 5분 후(T4), 문합이 종료되고 심장이 제 위치로 돌아오고 재관류된 15분 후(T5), 그리고 흉곽 봉합 15분 후(T6)에 FCI와 SCI를 각각 측정하였고, 각 시점에서 혼합정맥혈산소포화도와 평균동맥압을 비롯한 혈액학 지표들을 기록하였다. 자료의 분석은 Bland-Altman

기법을 사용하여 FCI와 SCI의 일치도를 평가하였다.

결과 : FCI를 Bland-Altman 기법으로 SCI와 비교한 결과 두 측정치 간 차이의 평균(편향, bias)과 표준편차(정밀도, precision)는 $0.17 \pm 1.15 \text{ L/min/m}^2$, %error 는 46.6% 이었다. 전신혈관저항과 평균동맥압이 정상인 시점에서 Bland-Altman 기법으로 FCI와 SCI를 비교한 결과 편향과 정밀도는 $0.18 \pm 0.71 \text{ L/min/m}^2$, %error 는 29.5% 이었다.

결론 : 본 연구에서 OPCAP 중 FCI는 SCI의 전체 측정값 간의 일치도는 미약하였으나 전신혈관저항과 평균동맥압이 정상범위에 있는 경우에 측정된 FCI와 SCI 간의 %error는 30% 미만이었다. 이는 위의 조건에서는 FloTrac의 동맥파형분석을 이용한 심박출량 측정법이 폐동맥카테터를 이용하여 측정한 심박출량 값을 대신할 수 있음을 의미하는 것으로, OPCAB 중에도 혈역학이 유지된다면 FloTrac의 동맥파형분석이 유용한 심박출량 감시장치로 사용될 수 있음을 보여주는 결과라고 생각한다.

핵심 되는 말: FloTrac 동맥파형분석,
무체외순환관상동맥우회술, 심박출량, 폐동맥카테터.

무체외순환관상동맥우회술에서 FloTrac
동맥파형분석(pulse-contour analysis)과 폐동맥카테터를 이용한
심박출량의 비교

<지도 교수 김 기 준>

연세대학교 대학원 의학과

유 영 철

I. 서론

최근 심장고정장치와 수술술기 및 마취관리의 발달로 체외순환과 연관된 합병증을 피할 수 있는 무체외순환관상동맥우회술(off-pump coronary artery bypass graft surgery, OPCAB)을 이용한 다혈관(multi-vessel) 관상동맥우회술의 시행이 증가하고 있다.^{1,2} 그러나 OPCAB 중에는 문합해야 할 관상동맥 부위의 노출을 위해 박동하고 있는 심장을 거상, 이동 및 압박하여야 하며, 좋은 수술 시야 확보를 위한 일시적인 관상동맥 결찰도 필요하다. 이런 조작들은 우심실 압박과 이완기 장애 및 일시적인 심근 허혈과 재관류에 의한 손상 등을 유발하며 그 결과 심박출량 감소와 심각한 혈액학적 변화가 나타날 수 있다.^{3,4} 따라서 이 시기의 지속적인 혈액학 감시가 매우

중요하다. OPCAB을 지속할 수 없는 경우 체외순환을 이용한 관상동맥우회술로 전환하여야 하는데 심한 저심박출량의 지속은 이를 판단하는데 있어 중요한 혈액학 지표가 된다.³

현재 임상에서 이용되는 여러 심박출량 측정 방법들 중에서는 폐동맥카테터를 삽입한 후 열희석법을 이용하여 심박출량을 측정하는 방법이 표준검사(gold standard)로 알려져 있으며, 심장수술을 시행 받는 환자에서는 지속적으로 심박출량을 측정할 수 있는 폐동맥카테터를 이용한 감시가 흔히 시행되고 있다. 그러나 이때 측정된 심박출량은 앞선 수 분간 측정한 심박출량의 평균값을 나타내기 때문에 실제 심박출량과는 차이가 있으며, OPCAB 중의 원위부 문합 시와 같이 심박출량이 급격하게 변화할 때는 이를 실시간으로 반영하지 못한다는 한계가 있다.^{5,6} 또한 심장 거상 후 발생하는 심장 모양의 변형으로 인한 삼첨판 역류의 발생 시 열희석법을 이용하여 측정한 심박출량은 부정확할 수 있다는 문제도 있다.³

이와 달리 동맥파형분석(pulse-contour analysis)을 이용한 심박출량 측정법은 환자의 동맥파형의 수축기 부분과 말초동맥저항을 이용하여 심박출량을 측정하는 것으로 동맥내에 카테터를 삽관하면 실시간으로 심박출량을 측정할 수 있으므로 OPCAB과 같이 혈액학 변화가

심하여 실시간으로 심박출량을 감시하는 것이 필요할 때 이론적으로 적합한 감시장치이다. 이는 폐동맥카테터 삽입에 비해 상대적으로 비침습적이고 폐동맥카테터의 삽입에 따른 합병증을 피할 수 있다는 장점도 있다.^{7,8} 동맥의 저항은 환자 개개인과 상태에 따라 다르므로 기존의 동맥파형분석을 이용한 심박출량 측정기기의 경우 이를 보완하기 위하여 전신혈관저항이 변화된 시점에서는 임의적으로 경흉열회석법이나(PiCCO) lithium(LiDCO)을 이용하여 기준 심박출량 값을 다시 측정하여 보정(calibration)을 시행하였으며, 이런 보정을 위해 중심정맥관을 삽입하였다.⁹ 그러나 수술 중, 특히 OPCAB과 같이 혈액학적 변화가 심한 경우 정확한 결과를 얻기 위한 지속적인 재보정(recalibration)이 권장된다.^{10,11} 최근에 개발된 FloTrac (Vigileo™, Edwards Lifesciences, Irvine, USA)은 동맥의 탄성과 저항의 정도를 환자의 성별, 나이, 키 및 몸무게 등 인구학적 정보와 동맥파형의 모양(skewness와 kurtosis)에 기초하여 1분 마다 자동으로 상수들을 보정한다. 따라서 별도의 보정을 필요로 하지 않기 때문에 중심정맥로의 확보 없이 간단하게 시행할 수 있다는 장점이 있다. 다른 동맥파형분석을 이용한 심박출량 측정기기들과 같이 중환자실에서 FloTrac으로 측정한 심박출량이 폐동맥카테터를 이용하여 측정한 심박출량과 일치함은 보고 된 바 있다.^{12,13} 그러나

아직 수술 중, 특히 OPCAB 중 원위부 관상동맥을 문합하는 시기와 같이 혈역학이 불안정한 시기에 FloTrac을 이용하여 측정한 심박출량을 폐동맥카테터를 이용하여 측정한 심박출량과 비교한 연구는 없었다. 이에 본 연구에서는 OPCAB을 시행 받는 50명의 환자에서 수술 중 FloTrac을 이용하여 측정한 심박출량의 정확도를 살펴보고 이에 영향을 미치는 인자들에 대하여 알아보하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

본원에서 2007년 6월부터 2008년 2월 사이에 관상동맥우회술을 시행 받은 18-65세 성인환자 50명을 대상으로 연구를 진행하였다. 사전에 병원 윤리위원회의 허락을 얻었으며 수술 전 환자를 방문하여 본 연구에 대한 설명 후에 서면 동의를 구하였다. 판막질환을 동반하거나 심장내 기형, 부정맥, 그리고 중등도 이상의 말초혈관질환을 가진 환자 및 응급 수술 환자는 대상에서 제외하였다. 군간 필요한 환자수는 α 0.05, 90% power에서 지속적 열회석법을 이용한 심박출량 측정과 간헐적 열회석법을 이용한 심박출량 측정 시 0.3 L/min의 심박출량 차이가 의미 있다고 간주할 때 25명의 환자가 필요하나,¹⁴ 실제 심장거상 시 심박출량비교에 대한 참고문헌이 없고 표준편차가 커질 수 있기 때문에 50명의 환자를 대상으로 하였다.

모든 환자의 마취관리 및 수술방법은 기존의 방법과 동일하게 진행하였으며 다음과 같다. 환자들은 마취전처치로 수술실 도착 1시간 전에 morphine 0.05-0.1 mg/kg를 근주받고 digitalis와 이뇨제를 제외한 모든 심장약을 수술 당일 아침까지 복용하였다. 수술실에 도착한 후 5개 유도전극을 이용해 심전도를 부착한 후 II 및 V₅ 유도를 지속적으로 감시하고, 국소마취 하에 요골동맥을 천자하고 도관을 삽입하였다. 우측 내경정맥을 통해 심박출지수(cardiac index, CI), 혼합정맥혈산소포화도(mixed venous oxygen saturation, SvO₂)의

지속적 감시가 가능한 폐동맥카테터(Swan-Ganz CCOmbo CCO/SvO₂, Edwards Lifesciences LLC, USA)를 거치하였다. 이후 요골동맥 도관과 FloTrac을 연결하여 CI를 감시하였다. 마취유도는 midazolam 0.05 mg/kg과 sufentanil 1.5-2.0 μ g/kg로 하고, rocuronium bromide 50 mg을 정주한 후 기관내삽관을 시행하였으며 마취유지는 sufentanil 0.5-1.5 μ g/kg/h과 vecuronium 1-2 μ g/kg/min 지속정주 및 흡입산소분율 0.4에서 호기말농도 1-2% sevoflurane으로 하였고, 호기말이산화탄소분압이 30-35 mmHg가 되도록 조절호흡을 시행하였다. 마취유도 직후부터 0.05-0.1 μ g/kg/min의 isosorbide dinitrate를 지속 정주하였다. 각 관상동맥의 원위부 문합 중에 저혈압이 발생하면 10-15° 정도의 두부하강위를 취하고 norepinephrine (8 μ g/ml) 용량을 조절하면서 정주하여 평균동맥압(mean arterial pressure, MAP)이 70 mmHg 이상이 되도록 하였으며 norepinephrine 투여량이 0.3 μ g/kg/min 이상 요구되는 경우 vasopressin 0.1 U을 정주하였다. 가온 매트리스, forced warm air blanket, 수액가온기 등을 이용하여 비인두 및 직장 온도가 36℃ 이상으로 유지되도록 하였다.

변수들은 마취유도 15분 후(T1), 흉곽과 심내막을 열고 Y-graft 문합 시작 15분 후(T2), 그리고 심장 거상 후 둔각변연지(obtuse marginalis branch) 문합을 위하여 관상동맥 근위부를 결찰하고 절개한 1분(T3)과

5분 후(T4), 문합이 종료 후 심장이 제 위치로 돌아오고 재관류된 15분 후(T5), 그리고 흉곽 봉합 15분 후(T6)에 측정한다. FloTrac은 20초 마다 측정하도록 설정하였다. CI는 FloTrac에 연결된 심박출량 측정기기에 표시된 최근 값 3개의 평균(FCI)과 폐동맥카테터에 연결된 심박출량 측정기기에 표시된 최근 STAT값 3개의 평균값(SCI)을 기록하여 비교하였다. 이때 SvO₂와 MAP 및 중심정맥압도 기록하였다.

통계분석은 SPSS 12.0 (SPSS Inc., IL, USA)을 사용하였으며 모든 값은 평균 $\pm$ 표준편차로 표시하였다. FloTrac으로 측정한 심박출량과 폐동맥카테터로 측정한 심박출량 간의 일치(agreement) 정도를 평가하기 위하여 paired t-test와 Bland-Altman 기법을 시행하였다.¹⁵ 이 분석법을 사용하여 동시에 측정한 두 측정치의 차이와 평균값 사이의 관계를 비교하여, 두 측정치간의 차이의 평균(편향, bias)과 표준편차(정밀도, precision)를 구했다. 이후에 두 측정치간 차이의 표준편차의 두 배수(2 x 정밀도)를 두 측정치의 평균값으로 나누어 percent error (%error)를 구했다. Bland-Altman 기법을 이용하여 구한 결과가 임상적으로 의미를 갖는가에 대한 판단은 Critchley의 연구를 토대로 30% 미만의 %error를 보일 때 FCI가 SCI와 일치한다고 보았다.¹⁶ 둔각변연지 문합시 삼첨판 역류가 중등도 이상 발생한

경우는 해당 시점의 CI값은 paired t-test와 Bland-Altman 기법 분석에서 제외하였다. 전신혈관저항을 SCI를 토대로 산출하여, 전신혈관저항지수(systemic vascular resistance index, SVRI)와 MAP가 정상범위 내에 있는 시점과 그렇지 않은 시점으로 구분하여 FCI와 SCI의 paired t-test 및 Bland-Altman 기법을 시행하였다. 또한, 수술 중 두 측정 방법으로 측정한 CI가 MAP의 변화에 영향을 받는가를 보기 위해 T1 값을 기준으로 하여 연구 기간 동안 두 방법으로 측정한 CI의 백분율변화(percent change)와 MAP의 백분율변화를 구한 후 이들 간의 회귀분석을 시행하였다. 가장 심한 심박출량의 저하를 보이는 순간변연지 문합 시 두 측정 방법으로 측정한 CI와 SvO₂의 변화의 상관관계를 보기 위해 T2 값을 기준으로 하여 T3 와 T4에 두 방법으로 측정한 CI의 백분율변화와 SvO₂의 백분율변화간의 회귀분석을 시행하였다.

III. 결과

환자의 나이, 성별, 체표면적, 고혈압과 당뇨병 유무, 수술 전 투약내역 및 수술 전 좌심실박출계수는 Table 1에, 각 시점에 측정된 혈액학적 변수들은 Table 2에 기술 되어있다.

50명의 환자에서 각각 6번의 시점에서 CI를 측정하였는데 paired t-test 결과 전체 FCI와 SCI는 유의한 차이를 보였으며, 각 시점 별로는 T1, T2 그리고 T4에서 유의한 차이를 보였다. (Table 3)

Bland-Altman 기법 분석 결과, 두 방법으로 측정한 전체 CI 간의 편향은 0.17 L/min/m^2 , 정밀도는 1.15 L/min/m^2 그리고 %error는 46.6%였다. 각 시기별 두 측정값 간의 %error는 모든 시점에서 30% 보다 높았으며, 가장 낮은 값은 T2에서의 34.8%, 가장 높은 값은 T1에서의 45.5%였다. (Table 3)

SVRI와 MAP가 정상범위 내에 있을 때 측정된 FCI와 SCI 값으로 시행한 paired t-test에서 전체 FCI와 SCI는 유의한 차이를 보였으며, 각 시점 별로는 T1과 T2 에서 유의한 차이를 보였다. 그러나 전체 FCI와 SCI의 평균 $\pm$ 표준편차는 각각 $2.5 \pm 0.3 \text{ L/min/m}^2$ 와 $2.4 \pm 0.4 \text{ L/min/m}^2$ 로 실제 임상적으로는 차이가 없는 값으로 볼 수 있다. Bland-Altman 기법으로 분석한 결과 전체 CI 간의 편향은 0.18 L/min/m^2 , 정밀도는 0.71 L/min/m^2 그리고 %error는 29.5%였다.

각시기별 두 측정값 간의 %error는 T3를 제외한 모든 시점에서 30%보다 낮았다. (Table 4)

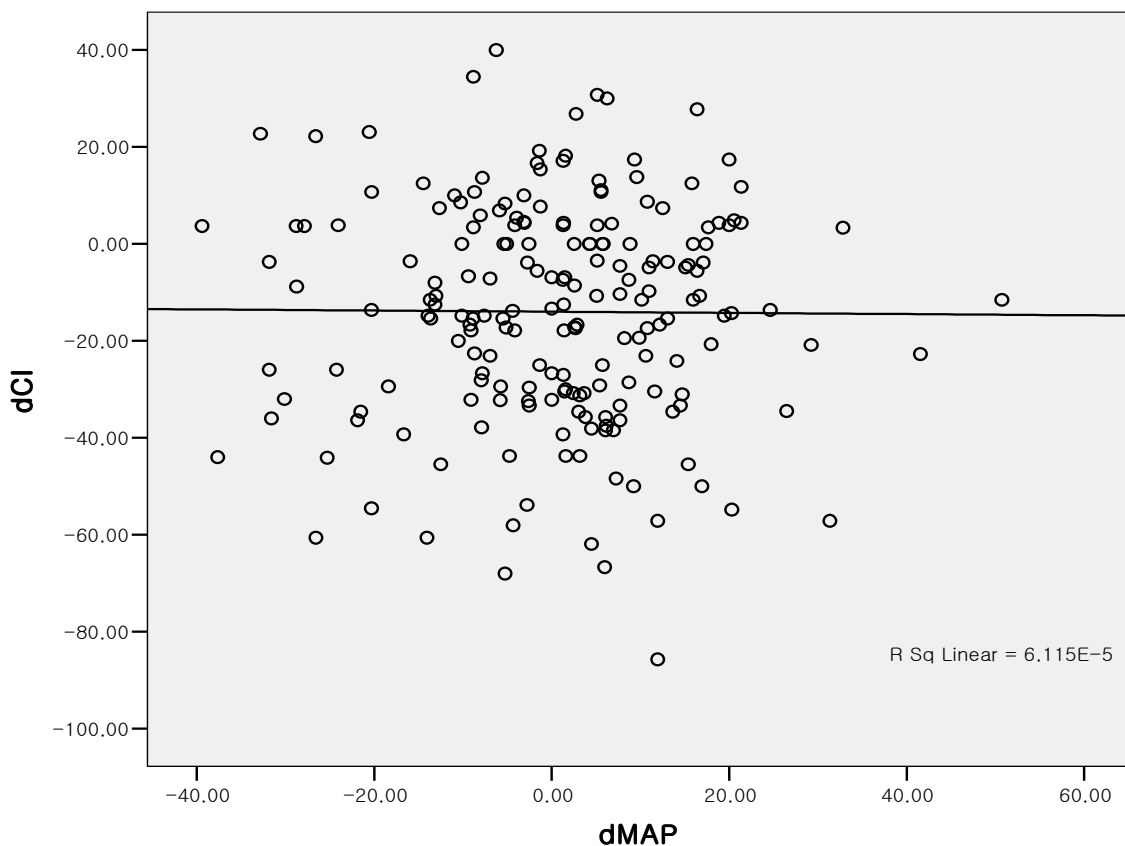
또한 SVRI가 비정상범위이거나 MAP가 비정상범위내의 시점에서 측정된 FCI와 SCI값으로 시행한 paired t-test에서는 전체 FCI와 SCI는 유의한 차이를 보였으며, 각 시점 별로는 T1, T2, T3, 그리고 T4에서 유의한 차이를 보였다. Bland-Altman 기법으로 분석한 결과 전체 CI 간의 편향은 -0.20L/min/m^2 , 정밀도는 1.39L/min/m^2 그리고 %error는 54.1%였다. 각시기별 두 측정값간의 %error는 모든 시점에서 40% 이상으로 높게 나타났다. (Table 5)

전체 MAP의 백분율변화와 SCI의 백분율변화간의 회귀 분석 결과 $R^2 < 0.001$ ($P = 0.913$)였던 반면에, MAP의 백분율변화와 FCI의 백분율변화간의 R^2 값은 0.249 ($P < 0.001$)였다. (Fig. 1, 2) 또한 SVRI와 MAP가 정상범위(SVRI: $1600\sim 2600\text{ dynes}\cdot\text{sec}\cdot\text{m}^2/\text{cm}^5$, MAP: $60\sim 80\text{mmHg}$) 내에 있을 때 측정된 MAP의 백분율변화와 SCI의 백분율변화간의 회귀분석 결과 에서 $R^2 < 0.001$ ($P = 0.689$)였고, MAP의 백분율변화와 FCI의 백분율변화간의 R^2 값은 0.197 ($P < 0.001$)였다.

T2를 기준으로 한 둔각변연지 문합 동안의 SvO₂의 백분율변화와 SCI의 백분율변화간의 R^2 은 T3에서 0.001 ($P = 0.839$)이고 T4에서 0.109 ($P = 0.046$)인 반면에 SvO₂의 백분율변화와 FCI의 백분율변화간의 R^2 은

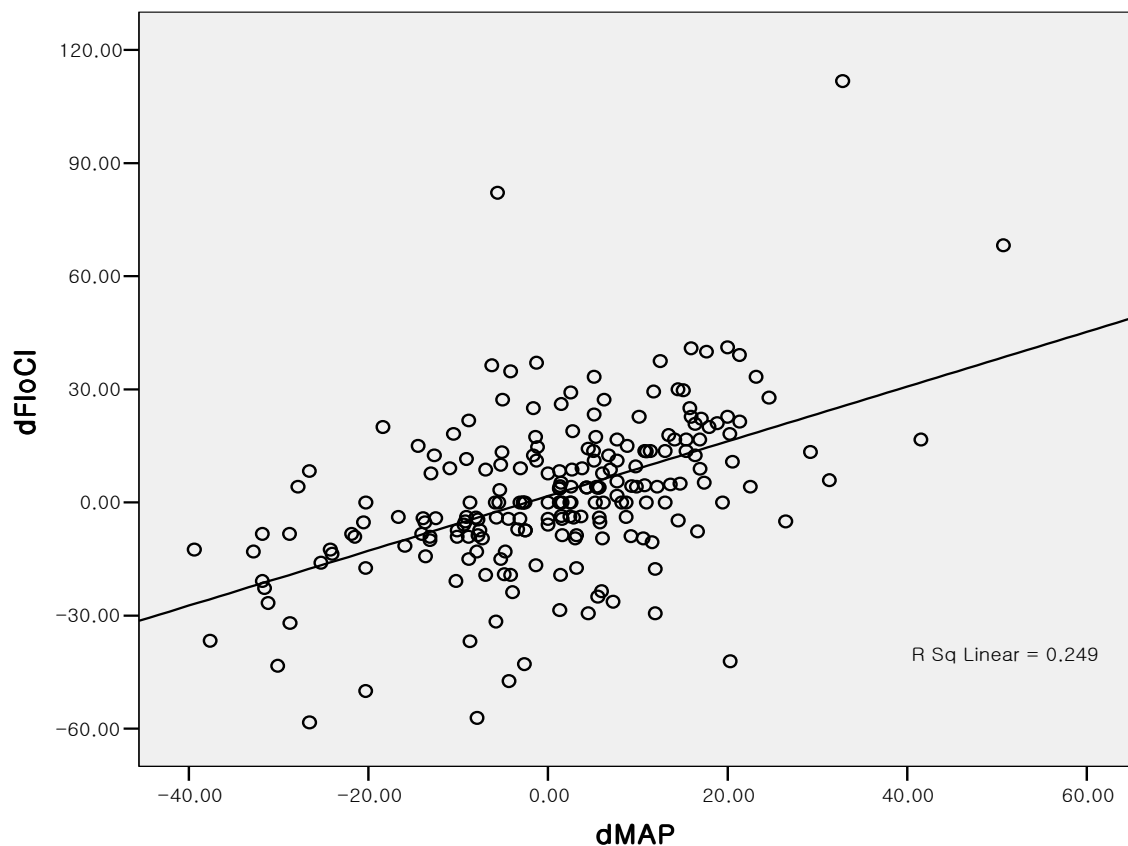
T3에서 0.009 ($P = 0.566$)이고, T4에서 0.012 ($P = 0.474$)였다. SVRI와 MAP가 정상인 시점에서 T2를 기준으로 한 둔각변연지 문합 동안의 SvO₂의 백분율변화와 SCI의 백분율변화간의 R²은 T3에서 0.045 ($P = 0.445$)이고 T4에서 0.524 ($P = 0.012$)였고 SvO₂의 백분율변화와 FCI의 백분율변화간의 R²은 T3에서 0.004 ($P = 0.819$)이고, T4에서 0.098 ($P = 0.412$)였다.

Fig. 1 Relationship between percent changes in the mean arterial pressure and STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter.



dCI: percent changes in STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter compared to baseline value, dMAP: percent changes in mean arterial pressure compared to baseline value. $R^2 < 0.001$, $P = 0.913$.

Fig. 2 Relationship between percent changes in the mean arterial pressure and cardiac index measured by FloTrac.



dFloCI: percent changes in cardiac index measured by FloTrac compared to baseline value, dMAP: percent changes in mean arterial pressure compared to baseline value. $R^2 = 0.249$, $P < 0.001$.

Table 1. Demographic data

Variables	Values (n = 50)
Age (yr)	63.48 ± 6.21
Gender (M/F)	38 / 12
BSA (m ²)	1.75 ± 0.15
DM	23
Hypertension	30
Medications	
nicorandil	23
nitrate	11
β blocker	24
αβ blocker	15
CCB	23
ARB	12
ACE inhibitors	14
diuretics	4
LVEF (%)	58.7 ± 9.3

All values are mean ± SD or number of patients. BSA: body surface area, DM: diabetes mellitus, CCB: calcium channel blocker, ARB: angiotensin receptor blockers ACE: angiotensin converting enzyme, LVEF: preoperative left ventricular ejection fraction.

Table 2. Changes in Hemodynamic Variables at Various Time Points

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
HR	60 ± 9	62 ± 10	64 ± 9	64 ± 9	66 ± 9.	71 ± 8
MAP	73 ± 10	73 ± 7	76 ± 9	73 ± 7	76 ± 7	75 ± 7
CVP	7 ± 2	7 ± 2	9 ± 3	9 ± 3	9 ± 3	9 ± 2
SvO ₂	78 ± 6	79 ± 5	68 ± 9	67 ± 8	75 ± 7	73 ± 7
SVRI	1956 ± 549	1925 ± 182	2564 ± 469	2641 ± 526	2264 ± 543	2113 ± 473

All values are mean ± SD. T1: 15 min after induction, T2: 15 min after Y graft, T3: 1 min after opening of obtuse marginalis branch, T4: 5 min after opening of obtuse marginalis branch, T5: 15 min after completion of grafting, T6: 15 min after sternal closure, HR: heart rate (beats/min), MAP: mean arterial pressure (mmHg), CVP: central venous pressure (mmHg), SvO₂: mixed venous oxygen saturation (%), SVRI: systemic vascular resistance index (dynes·sec·cm⁻⁵· m²).

Table 3. Comparisons between STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter and cardiac index measured by FloTrac.

Time	Mean SCI (L/min/m ²)	Mean FCI (L/min/m ²)	P Value	Bias (L/min/m ²)	Precision (L/min/m ²)	%error (%)
T1	2.8 ± 0.6	2.3 ± 0.3	< 0.001	0.54	1.21	45.5
T2	2.8 ± 0.4	2.4 ± 0.4	< 0.001	0.47	0.91	34.8
T3	2.1 ± 0.3	2.2 ± 0.4	0.327	-0.07	0.88	40.3
T4	2.0 ± 0.4	2.1 ± 0.4	0.049	-0.14	0.86	45.2
T5	2.5 ± 0.6	2.4 ± 0.5	0.193	0.13	1.23	44.8
T6	2.5 ± 0.5	2.4 ± 0.4	0.336	0.08	1.07	43.2
Total	2.5 ± 0.6	2.3 ± 0.4	< 0.001	0.17	1.15	46.6

All values are mean ± SD. SCI: STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter, FCI: cardiac index measured by FloTrac, T1: 15 min after induction, T2: 15 min after Y graft, T3: 1 min after opening of obtuse marginalis branch, T4: 5 min after opening of obtuse marginalis branch, T5: 15 min after completion of grafting, T6: 15 min after sternal closure.

Table 4. Comparisons between STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter and cardiac index measured by FloTrac at the points of normal SVRI* and MAP**

Time	Mean SCI (L/min/m ²)	Mean FCI (L/min/m ²)	P Value	Bias (L/min/m ²)	Precision (L/min/m ²)	%error (%)
T1	2.7 ± 0.3	2.2 ± 0.3	< 0.001	0.4	0.72	30.2
T2	2.6 ± 0.3	2.3 ± 0.3	0.001	0.39	0.75	29.8
T3	2.1 ± 0.3	2.2 ± 0.4	0.249	0.16	0.39	39.2
T4	2.0 ± 0.4	2.1 ± 0.4	0.293	0.09	0.57	28.8
T5	2.3 ± 0.3	2.2 ± 0.4	0.633	0.04	0.69	26.1
T6	2.6 ± 0.3	2.6 ± 0.4	0.879	0.01	0.74	28.8
Total	2.5 ± 0.3	2.4 ± 0.4	< 0.001	0.18	0.71	29.5

All values are mean ± SD. SCI: STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter, FCI: cardiac index measured by FloTrac, T1: 15 min after induction, T2: 15 min after Y graft, T3: 1 min after opening of obtuse marginalis branch, T4: 5 min after opening of obtuse marginalis branch, T5: 15 min after completion of grafting, T6: 15 min after sternal closure, *: 1600~2600 dynes·sec·m²/cm⁵, **: 60~80 mmHg

Table 5. Comparisons between STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter and cardiac index measured by FloTrac at the points of abnormal SVRI* or abnormal MAP**

Time	Mean SCI (L/min/m ²)	Mean FCI (L/min/m ²)	P Value	Bias (L/min/m ²)	Precision (L/min/m ²)	%error (%)
T1	3.0 ± 0.8	2.2 ± 0.4	0.003	-0.74	1.66	61.2
T2	3.3 ± 0.5	2.5 ± 0.6	0.008	-0.82	1.26	47.4
T3	2.0 ± 0.3	2.2 ± 0.4	0.014	0.28	0.86	41.0
T4	1.8 ± 0.3	2.1 ± 0.3	0.001	0.31	0.83	44.3
T5	2.5 ± 0.8	2.3 ± 0.4	0.297	-0.19	1.46	52.9
T6	2.4 ± 0.7	2.3 ± 0.5	0.513	-0.14	1.45	57.9
Total	2.7 ± 0.6	2.3 ± 0.4	0.001	-0.20	1.39	54.1

All values are mean ± SD. SCI: STAT mode cardiac index measured by pulmonary artery catheter, FCI: cardiac index measured by FloTrac, T1: 15 min after induction, T2: 15 min after Y graft, T3: 1 min after opening of obtuse marginalis branch, T4: 5 min after opening of obtuse marginalis branch, T5: 15 min after completion of grafting, T6: 15 min after sternal closure, *: < 1600 or > 2600 dynes·sec·m²/cm⁵, **: < 60 or > 80 mmHg

IV. 고찰

현재 임상에서 심박출량을 측정하는 방법의 표준검사는 폐동맥카테터를 삽입한 후 열희석법을 이용하여 측정하는 것으로 알려져 있다. 이후 지속적으로 심박출량을 측정하는 폐동맥카테터가 임상에서 널리 사용되기 시작하면서 이의 정확성과 신뢰도에 대한 많은 연구가 시행되었다.¹⁷⁻²¹ 중환자실의 환자들을 대상으로 간헐적인 주입(intermittent bolus)을 통하여 측정한 심박출량과 지속적으로 측정된 심박출량을 비교한 Yelderman등과¹⁷ Boldt등은¹⁸ 무시할 수 있을 정도의 편향(< 0.1 L/min)과 정밀도가 관찰됨을 보고하면서, 지속적으로 측정된 심박출량이 간헐적인 식염수 정주를 이용해 측정한 심박출량을 대신할 수 있다고 하였고, 이후로도 많은 연구들이 이러한 결과를 뒷받침하였다. 그러나 지속적으로 측정되는 심박출량은 지난 수 분간 측정한 심박출량의 평균값을 나타내기 때문에 실제 심박출량과 수 분간의 괴리가 있어 OPCAB 중의 원위부 문합 시와 같이 급격하게 변화하는 심박출량을 실시간으로 반영하지 못한다는 단점이 있다.^{5,6} 또한 심장 거상 시 심장 모양의 변형으로 인한 삼첨판 역류가 발생할 수 있는데 이 경우 열희석법을 이용하여 측정한 심박출량은 정확하지 못하다는 문제가 있다. 이런 시점에서는 혈액학 상태에 대한 빠른 평가와 관리가 중요하기 때문에 이러한

문제를 지닌 심박출량 측정법으로 측정된 값은 신빙성이 낮을 수 있다. 시간지연을 보완하기 위하여 폐동맥카테터를 이용한 지속적 심박출량 측정 기구에서 50-60초 단위로 변화된 심박출량 값을 보여주는 STAT mode가 고안 되었다. 그러나 심박동수 조작을 통해 실제 심박출량을 급작스럽게 변화시키면, 대사율이 일정할 때 심박출량과 비례적 상관관계가 있는 SvO₂가 변화한 후 270 초 정도 지나서야 STAT mode의 심박출량이 증가한다는 보고로 미루어 이 또한 심박출량의 변화를 실시간으로 반영한다고 보기는 어렵다.²²

이에 반해 가장 최근에 개발된 FloTrac 동맥파형분석기기는 동맥파형을 이용하여 심박출량을 측정 하는 것으로 다른 동맥파형을 이용한 심박출량 측정기기인 PiCCO나 LiDCO와는 달리 보정을 위한 중심정맥로의 확보가 필요 없으며 1분 마다 상수가 자동으로 재보정 된다는 특징과 OPCAB에서 심장 거상 후 발생하는 삼첨판역류에도 영향을 받지 않는다는 장점을 지니고 있다.²³ 실제로 FloTrac을 이용하여 측정한 심박출량에 대한 기존의 연구들에서 보면 혈역학 변화가 적은 수술 또는 심장수술 후 중환자실에서 측정한 값들은 폐동맥카테터를 통하여 측정한 심박출량과의 일치함이 보고 된 바 있다.^{12,13,23} 그러나 현재까지 혈역학적 변화가 심한 OPCAB에서 아직 그 정확성이 입증된 바는 없으며, 위에서 언급한 FloTrac이

폐동맥카테터에 비하여 가지고 있는 이론적인 장점들에 대한 증거도 부족하다.

이에 저자들은 OPCAB 중 FCI와 SCI의 측정값을 Bland-Altman 기법을 이용하여 비교하였다. 새로운 측정방법의 평가에 있어서 지금까지는 이전까지 표준검사로 알려진 측정방법과 새로운 측정방법으로 측정한 두 값 간의 상관계수를 구하고 선형 회귀방정식을 이용하는 것이 일반적이었다. 그러나 상관계수는 두 변수의 관계의 강도(strength)를 의미할 뿐이며 표본의 범위에 의해 영향을 받기 때문에 최근에는 두 측정방법의 일치도를 평가하기 위해서는 Bland-Altman 기법을 사용하는 것이 더 타당하게 받아들여지고 있다. Bland-Altman 기법은 두 측정치 간 차이의 평균값 및 표준편차를 가지고 limits of agreement ($\text{bias} \pm [2 \times \text{precision}]$)를 산출하며, 이 범위의 값들이 임상적으로 허용할 수 있는 범위 내에 있을 때, 두 측정방법이 서로 일치하며, 호환성이 있다고 한다.¹⁶ 심박출량의 경우에는 3-7 L/min로 넓은 범위를 가지며 정상 심박출량에서는 값 자체가 크기 때문에 측정방법과 관계없이 심박출량이 적은 경우보다 상대적으로 더 큰 편향과 정밀도를 보이게 된다. 따라서 이와 같은 평균 심박출량의 차이에 따른 영향을 줄이기 위해 정밀도의 두 배수를 평균 심박출량으로 나눈 %error를 통해

일치도를 평가하며, 그 기준은 30% 미만일 때 두 심박출량 측정방법이 호환성이 있다고 판단한다.¹⁶

본 연구에서는 전 시기에 측정한 SCI와 FCI를 paired t-test를 이용하여 비교하였을 때 두 측정치 간에 유의한 차이가 있었으며, 이는 Bland-Altman 기법으로 분석한 결과에서도 마찬가지였다. 두 측정값 간의 %error는 전체시점에서 46.6%였고 T2 시점(34.8%)을 뺀 나머지 시점 모두에서 제외하고는 40% 이상의 %error를 나타내었다. 이는 FCI의 측정값이 SCI를 대신할 수 없음을 의미 한다. 각 시점 별 paired t-test에서 T3, T5와 T6에서는 두 값간의 유의한 차이가 없었으나, Bland-Altman 기법으로 분석한 결과 모든 시점들에서 일치도를 가장 잘 나타내는 %error가 30% 이상이었으며 각 시점 별 %error 또한 paired t-test의 P 값과 아무런 상관관계를 보이지 않았다.

FloTrac과 같은 동맥파형분석기기는 환자의 동맥파형의 수축기 부분과 동맥저항을 이용하여 심박출량을 측정하는 것으로 동맥파형의 모델은 말초저항(peripheral resistance), 동맥 순응도(arterial compliance), 특징적인 대동맥 교류저항(characteristic aortic impedance)를 통하여 제시되므로²⁴ FCI는 SVRI에 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다. 또한 Fig. 2에서와 같이 FCI는 R^2 값이 낮기는 하나 MAP와 통계적으로 유의한 상관관계를 보인다. 따라서 저자들은 SVRI와 MAP가 정상범위

내에 있을 때는 FCI가 보다 정확한 값을 나타낼 것이라고 가정하고 SVRI와 MAP가 정상 일 때 측정한 FCI와 SCI 값을 Bland-Altman 기법으로 다시 분석하였다. 그 결과 두 측정값 간의 전체 %error는 29.5%였으며 T1 시점을 제외한 모든 시점에서 30% 미만의 값을 나타내었다. 반면에 SVRI나 MAP가 비정상범위 내에 있을 때 측정된 두 측정값 간의 %error는 54.1%로 높게 나타났다. 이러한 결과는 SVRI와 MAP가 정상범위 내에 있을 때는 두 심박출량 측정방법이 호환성이 있다는 것을 시사한다.

그러나 심장거상 시 실제 심박출량의 변화를 가장 잘 반영한다고 알려진 SvO₂의 변화에 대한 두 측정법으로 측정한 심박출량의 변화를 비교한 결과, SCI의 경우 심장거상 5분 후에는 SvO₂의 변화를 반영하였으나, FCI는 1분마다 재보정이 이루어져 SvO₂의 변화를 더 빨리 반영할 것이라는 예상과는 달리 SvO₂의 변화를 5분 후에도 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 SVRI와 MAP가 정상범위 내에 있을 때도 R²값이 약간씩 증가는 하였으나 마찬가지였다. 심장거상 시와 같이 실제 심박출량이 급격하게 변화하는 시기에 FCI와 SCI가 그 변화를 반영할 수 있는가에 대한 관찰은 이전의 임상 연구에서는 시행된 바가 없으나, SCI가 심박출량의 변화로 인한 SvO₂의 변화를 반영하는데 270 초 정도의 시간지연이 있다는 이전의

동물 실험의 결과와는 일치하는 결과이다. 본 연구에서는 심장 거상 후 중등도 이상의 삼첨판 역류를 보이는 환자가 없었으므로 심장 거상 시에 SCI를 FCI의 정확성을 살펴보는 표준검사로 보는데 문제가 없다고 생각한다.

본 연구결과를 토대로 보았을 때, FloTrac은 SVRI와 MAP가 정상범위 내에 있을 때, 간단한 동맥관의 삽입만으로 보정을 위한 중심정맥로의 확보가 필요 없이 임상적으로 유용한 심박출량에 대한 정보를 제공할 수 있어 지속적인 혈압 감시가 요구되는 환자들에 있어서 추가적인 침습적인 행위 없이 심박출량에 대한 정보를 얻는 것이 가능함을 시사하며, 이것이 환자관리에 실질적인 도움을 나타내는지에 대한 추후 연구가 요구된다.

V. 결론

본 연구에서는 OPCAB을 시행 받는 환자에서 동맥파형분석을 이용하여 심박출량을 측정하는 FloTrac이 심박출량 측정의 표준검사인 폐동맥카테터를 이용하여 측정한 심박출량을 대신할 수 있는가를 Bland-Altman 기법을 이용하여 살펴보았으며, 그 결과 두 측정값 간의 일치도는 임상적으로 허용되는 범위를 벗어나는 높은 %error를 보였다. 또한 실제 심박출량의 변화가 심한 심장 거상 시에 이를 빠르게 반영하는 것으로 알려진 SvO₂의 변화와 폐동맥카테터를 이용하여 측정한 심박출량은 심장 거상 5분 후에 밀접한 상관관계를 나타냈으나, FloTrac의 동맥파형분석을 이용하여 측정한 심박출량은 SvO₂의 변화를 반영하지 못하였다. 그러나 SVRI와 MAP가 정상범위 내에 있을 때 측정한 두 측정값은 T2, T5, T6와 같이 혈액학이 안정된 시기에서 %error가 30% 미만으로서 일치함을 보였다. 따라서 이와 같은 경우에 FloTrac의 동맥파형분석을 이용한 심박출량 측정법이 임상적으로 유용하게 사용될 수 있다고 생각한다.

참고문헌

1. Puskas JD, Wright CE, Ronson RS, Brown WM, Gott JP, Guyton RA. Off pump multivessel coronary bypass via sternotomy is safe and effective. *Ann Thorac Surg* 1998; 66: 1068-72.
2. Kobayashi J, Tashiro T, Ochi M, Yaku H, Watanabe G, Satoh T, et al. Early outcome of a randomized comparison of off-pump and on-pump multiple arterial coronary revascularization. *Circulation* 2005; 112: 338-43.
3. Chassot PG, van der Linden P, Zaugg M, Mueller M, Spahn DR. Off-pump coronary artery bypass surgery: physiology and anaesthetic management. *Br J Anaesth* 2004; 92: 400-13.
4. Mathison M, Edgerton JR, Horswell JL, Akin JJ, Mack MJ. Analysis of hemodynamic changes during beating heart surgical procedures. *Ann Thorac Surg* 2000; 70: 1355-61.
5. Aranda M, Mihm FG, Garrett S, Mihm MN, Pearl RG. Continuous cardiac output catheters: delay in vitro response time after controlled flow changes. *Anesthesiology* 1998; 89: 1592-5.

6. Siegel LC, Hennessy MM, Pearl RG. Delayed time response of the continuous cardiac output pulmonary artery catheter. *Anesth Analg* 1996; 83: 1173-7.
7. Buhre W, Weyland A, Kazmaier S, Hanekop GG, Baryalei MM, Sydow M, et al. Comparison of cardiac output assessed by pulse-contour analysis and thermodilution in patients undergoing minimally invasive direct coronary artery bypass grafting. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 1999; 13: 437-40.
8. Godje O, Thiel C, Lamm P, Schmitz C, Thiel C, Weinert M, et al. Less invasive, continuous hemodynamic monitoring during minimally invasive coronary surgery. *Ann Thorac Surg* 1999; 68: 1532-6.
9. Berton C, Cholley B. Equipment review: new technique for cardiac output measurement - esophageal Doppler, Fick principle using carbon dioxide, and pulse contour analysis. *Crit Care* 2002; 6: 216-21.
10. Goedje O, Hoeke K, Lichtwarck-Aschoff M, Faltchauser A, Lamm P, Reichart B. Continuous cardiac output by femoral arterial thermodilution calibrated pulse contour analysis: comparison with pulmonary arterial thermodilution. *Crit Care Med* 1999; 27: 2407-12.

11. Halvorsen PS, Espinoza A, Lundblad R, Cvancarova M, Hol PK, Fosse E, et al. Agreement between PiCCO pulse-contour analysis, pulmonary artery thermodilution and transthoracic thermodilution during off-pump coronary artery bypass surgery. *Acta Anaesthesiol Scand* 2006; 50: 1050-7.
12. Manecke GR. Edwards FloTrac sensor and Vigileo monitor: easy, accurate, reliable cardiac output assessment using arterial pulse wave. *Expert Rev Med Devices* 2005; 2: 523-7.
13. Manecke GR, Auger WR. Cardiac output determination from the arterial pressure wave: clinical testing of a novel algorithm that does not require calibration. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2007; 21 :3-7.
14. Button D, Weibel L, Reuthebuch O, Genoni M, Zollinger A, Hofer CK. Clinical evaluation of the FloTrac/Vigileo system and two established continuous cardiac output monitoring devices in patients undergoing cardiac surgery. *Br J Anaesth* 2007; 99: 329-36.
15. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1986; 1: 307-10.
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. Yelderman ML, Ramsay MA, Quinn MD, Paulsen AW, McKown RC, Gillman PH. Continuous thermodilution cardiac output measurement in intensive care unit patients. J Cardiothorac Vasc Anesth 1992; 6: 270-4.

18. Boldt J, Menges T, Wollbruck M, Hammermann H, Hempelmann G. Is continuous cardiac output measurement using thermodilution reliable in the critically ill patient? Crit Care Med 1994; 22: 1913-8.

19. Jacquet L, Hanique G, Glorieux D, Matte P, Goenen M. Analysis of the accuracy of continuous thermodilution cardiac output measurement. Comparison with intermittent thermodilution and Fick cardiac output measurement. Intensive Care Med 1996; 22: 1125-9.

20. Bottiger BW, Soder M, Rauch H, Bohrer H, Motsch J, Bauer H, et al. Semi-continuous versus injectate cardiac output measurement in intensive care patients after cardiac surgery. Intensive Care Med 1996; 22: 312-8.

21. Munro HM, Wood CE, Taylor BL, Smith GB. Continuous invasive cardiac output monitoring--the Baxter/Edwards Critical-Care Swan Ganz IntelliCath

and Vigilance system. Clin Intensive Care 1994; 5: 52-5.

22. Lazor MA, Pierce ET, Stanley GD, Cass JL, Halpern EF, Bode RH Jr. Evaluation of the accuracy and response time of STAT-mode continuous cardiac output. J Cardiothorac Vasc Anesth 1997; 11: 432-6

23. Button D, Weibel L, Reuthebuch O, Genoni M, Zollinger A, Hofer CK. Clinical evaluation of the FloTrac/Vigileo™ system and two established continuous cardiac output monitoring devices in patients undergoing cardiac surgery. Br J Anaesth 2007; 99: 329-36.

24. Berton C, Cholly B. Equipment review: new techniques for cardiac output measurement--oesophageal Doppler, Fick principle using carbon dioxide, and pulse contour analysis. Crit Care 2002; 6: 216-21

Abstract

Comparison of cardiac output measured by FloTrac pulse-contour analysis and pulmonary artery catheter during off-pump coronary artery bypass graft surgery

Young Chul Yoo

Department of Medicine
The Graduate School, Yonsei University

(Directed by Professor Ki-Jun Kim.)

Introduction: The common clinical experience that OPCAB patients often require more fluid resuscitation, vasopressors, or inotropic support stresses the importance of vigilant monitoring to guide the need for intervention and monitor the effects of each therapy. Therefore, continuous monitoring of cardiac output is advisable. The aim of this study was to compare the cardiac index measured by FloTrac pulse-contour analysis (FCI) and STAT mode of pulmonary artery catheter (SCI) during off-pump coronary artery bypass graft surgery.

Objectives and Methods: Matched sets of FCI and SCI were collected in 50 patients undergoing elective OPCAB at specific time periods; 15 min post

induction, 15 min after pericardiotomy, 1 min and 5 min after stabilizer application for grafting on the obtuse marginalis branch, 15 min after completion of grafting and 15 min after sternal closure. Bland-Altman analysis was used to compare the agreement between FCI and SCI. Hemodynamic variables including mixed venous oxygen saturation and mean arterial pressure (MAP) were also recorded at the same time points.

Results: Bland-Altman analysis of CI measurements yielded a bias $\pm$ precision of 0.17 ± 1.15 L/min/m², and %error of 46.6% for FCI compared with SCI measurements. At the point of normal systemic vascular resistance index (SVRI) and MAP, Bland-Altman analysis of CI measurements yielded a bias $\pm$ precision of 0.18 ± 0.71 L/min/m², and %error of 29.5% for FCI compared with SCI measurements.

Conclusions: Although the overall agreement between FCI and SCI data was poor, further analysis revealed good agreement when the SVRI and MAP were within normal range. The use of cardiac index measured by FloTrac as a therapeutic guideline in cases with expected hemodynamic changes such as multivessel OPCAB is not advisory and should only be limited to patients having normal SVRI and MAP.

Key Words : Off-pump CABG, FloTrac, stat cardiac index, volumetric pulmonary artery catheter.