

도플러 심초음파법에 의한 심박출량의 계측에 관한 연구

부산대학교 의과대학 내과학교실

홍택중 · 하철봉 · 신영우 · 신영기

= ABSTRACT =

Doppler Echocardiographic Measurement of Cardiac Output
Taek Jong Hong, M.D., Cheol Bong Ha, M.D.,

Yung Woo Shin, M.D. and Yeong Kee Shin, M.D.

*Department of Internal Medicine, College of Medicine,
Pusan National University*

A noninvasive method for assessing cardiac output was evaluated by comparing it with thermodilution determinations in 25 patients who admitted to Pusan national university hospital from March, 1985 to December, 1986. This method used M-mode & two dimensional echocardiography to measure the internal diameter of aortic valve anulus & pulmonary valve anulus and pulsed doppler echocardiography to obtain aortic & pulmonary blood velocity. Good correlations were observed between thermodilution and doppler echocardiographic measurements of cardiac output from aortic flow ($r=0.98$, $p<0.05$) & pulmonary flow ($r=0.86$, $p<0.05$). Linear regression analysis yielded $y=0.91X0.14$ for aortic flow and $y=0.77X0.84$ for pulmonary flow.

These results indicate that accurate cardiac output can be measured by noninvasive & simple doppler echocardiography.

서 론

심박출량은 심장의 기능을 평가하는 단서로서 그 중요성을 인정받고 있는 지수이지만¹⁾, 최근까지 임상에서 심박출량의 계측시에는 주로 Swan-Ganz 도자를 이용하는 등 침습적이고 관혈적인 방법들에 의존하여 오고 있는 터였다. 따라서 보다 용이하고, 정확하며, 환자에게 부담이 없고, 재현성이 높은,

비침습적이고, 비관혈적인 검사법이 기대되어 오는 실정이었다. 근자에 임상에 사용이 가능하게 된 도플러법이 이와같은 조건을 비교적 만족하는 비침습적 심박출량 측정법이라고 주장하는 보고가 나오고 있지만²⁻⁶⁾, 국내에서는 이에 대한 연구업적이 미미하였다. 이에 저자는 간혈파 도플러 심초음파 검사법으로 심박출량을 측정하는 방법 및 이의 임상적 유의성에 대해 추구하였다.

대상 및 방법

1. 대 상

1985년 3월부터 1986년 12월까지 본원 내과에 입원한 25명의 심장판막증 환자를 대상으로 하였으며, 평균연령은 33(15~55)세였고, 남자 10명 여자 15명이었다. 연구대상에는 열회석법에 의한 심박출량 측정에 오차를 유발할 수 있는 폐동맥판 폐쇄부전증 예는 제외하였다.

Table 1. Age, sex, thermodilution and Doppler data of the subjects

No.	Age/sex	Thermodilution	Doppler C.O. (l/min)	
		C.O. (l/min)	AF	PF
1	30 / M	1.8	1.8	2.3
2	29 / F	1.7	1.7	2.1
3	46 / F	2.3	2.2	2.5
4	40 / F	2.7	2.3	2.7
5	15 / F	2.3	2.3	2.5
6	34 / M	2.7	2.4	3.0
7	21 / M	3.3	3.4	4.0
8	46 / F	1.7	1.9	1.7
9	20 / M	2.1	2.1	3.0
10	25 / M	3.0	2.8	3.1
11	40 / F	1.7	1.7	2.1
12	20 / M	1.4	1.4	2.1
13	40 / M	1.7	1.8	2.2
14	35 / F	1.9	1.8	1.8
15	55 / F	2.4	2.3	2.4
16	20 / M	1.8	1.6	1.8
17	37 / F	3.1	3.0	3.1
18	32 / F	2.3	2.3	2.8
19	42 / F	3.3	3.3	3.0
20	38 / F	1.6	1.6	2.0
21	22 / F	1.4	1.4	2.4
22	21 / F	3.8	3.5	3.9
23	37 / F	1.5	1.4	2.2
24	45 / M	2.0	2.0	2.6
25	36 / F	2.1	2.1	2.0

Abbreviations: C.O. ; cardiac output, AF ; aortic flow, PF ; pulmonary flow

2. 측정 방법

검사 대상의 환자는 심도자술을 시행하면서 주 간폐동맥에 Swan-Ganz 도자를 삽입하여 열회석법으로 0°C 생리식염수 10ml를 급속히 주입한 후 Cardiac output computer 9520으로 심박출량을 측정하였으며, 이를 3회 반복 측정하여 얻은 평균치를 심박출량 값으로 정했다.

도플러법에 의한 심박출량 측정은 Aloka SSD 880을 사용하여 시행하였다. 대동맥 혈류속도를 측정하기 위해서는 대동맥기부를 포함하는 심첨4강 단층단면상에서 혈류의 방향과 도플러 beam의 각도를 최소한으로 유지하면서^{8,9)} 대동맥판륜 위치에서^{10,11)} 그리고 혈류의 중심에 sample volume을 놓고 간헐파도플러법을 이용해서 혈류속도를 기록하였다^{12,13)}, 대동맥판륜 내경은 M-mode를 이용해서^{10,11)} 수축초기에 M-mode 상의 내면에서 내면까지 측정하였다. 폐동맥판막의 직경 및 혈류속도는 대동맥기부 단층단면상에서 단층심음향도를 이용해 수축초기에 폐동맥판륜경을 측정하였고, 혈류속도는 대동맥 혈류속도 측정에서와 같은 방법으로 측정하였다.

혈류속도 측정시 10 beat 이상 기록해서 평균 심박동수를 구하고, 또한 혈류속도도 평균치를 구했다. 대동맥혈류는 구혈시간과 혈류속도의 높이의 곱의

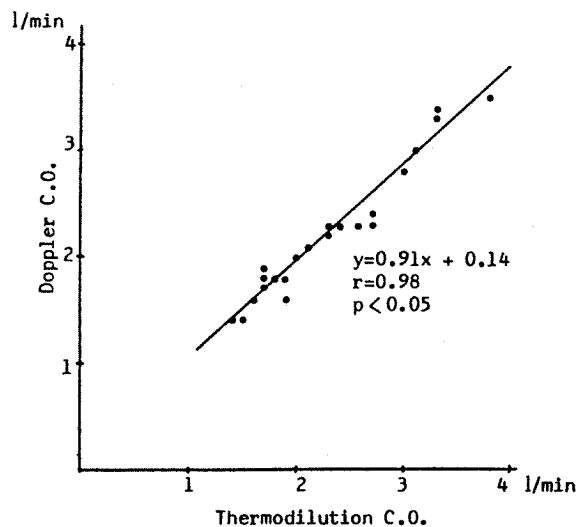


Fig. 1. Comparison of aortic flow measured from Doppler and thermodilution method. C.O. : cardiac output.

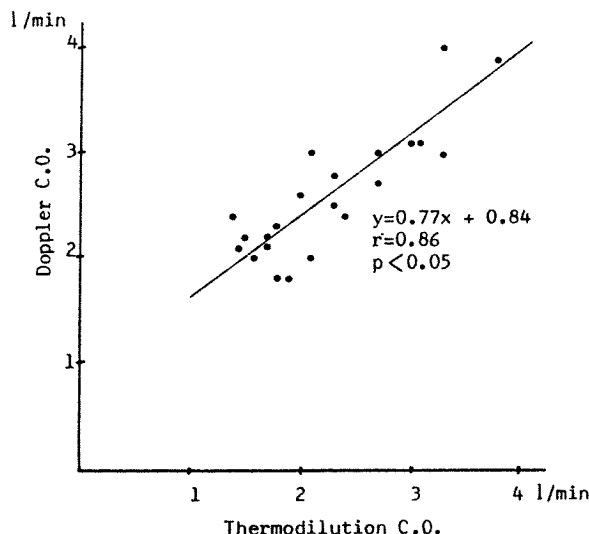


Fig. 2. Comparison of pulmonary flow measured from Doppler and thermodilution method. C.O. : cardiac output.

1/2로써 면적을 구해 혈류속도의 시간적분으로 삼았고, 폐동맥혈류는 planimetry를 이용해서 혈류속과 곡선의 면적을 구해 혈류속도의 시간적분으로 삼았다¹⁴⁾.

결 과

연구대상 예에서 열회석법으로 측정된 심박출량은 평균이 분당 2.22l, 범위는 분당 1.4~3.8l 이고, 간혈과 도플러법에 의한 대동맥판류에서의 심박출량은 평균이 분당 2.16l, 범위가 분당 1.4~3.5l, 또 폐동맥판류에서는 평균이 분당 2.53l, 범위가 분당 1.7~3.9l였다(table 1).

열회석법으로 측정한 심박출량과 간혈과 도플러법에 의한 대동맥판류에서의 심박출량은 서로 통계학적으로 유의하게 상관하는 것을 알 수 있었으며 ($r=0.98$, $p<0.05$) 이 관계는 도플러법으로 측정한 심박출량을 y로, 열회석법으로 측정한 심박출량을 x로 했을 때 $y=0.91x+0.14$ 의 식으로 표시할 수 있었다. 즉 도플러법에 의한 심박출량이 열회석법에 의한 경우보다 낮은 값을 보이는 경향이었다(Fig. 1).

또 열회석법으로 측정한 심박출량과 간혈과 도플러법에 의한 폐동맥판류에서의 심박출량도 서로 통계학적으로 유의한 상관관계를 보였으나 대동맥판류에서 측정된 경우보다는 낮은 상관관계를 나타내었다($r=0.86$, $P<0.05$), 이 관계는 도플러법으로 측정한 폐동맥판류에서의 심박출량을 y로, 열회석법에 의한 심박출량을 x로 표시했을 때 $y=0.77x+0.84$ 의 식으로 표시할 수 있었다(fig. 2).

고 안

심혈관계를 흐르는 혈류는 직경이 일정한 관을 흐르는 액체의 흐름과 유사하다고 할 수 있으며, 관을 흐르는 액체의 양은 관의 단면적과 단위 시간동안 흘러간 거리의 곱으로 표시할 수 있다. 즉 액체량을 Q로 거리를 S로 그리고 관의 단면적을 A로 했을 때 $Q=S \times A$ 인 것이다. 또 거리 S는 시간 T 동안 단면을

흘러간 유속의 시간 적분이므로 $S = \int_0^T v(t) dt$ 로, 그리고 단면적은 원형일때 직경을 D로 하면

$A = \frac{\pi D^2}{4}$ 인 것이다. 따라서 $Q = \int_0^T v(t) dt \times \frac{\pi D^2}{4}$ 의 공식으로 표시할 수 있는 것이다.

단위 시간당 흘러간 유속의 시간 적분은 도플러 심초음파법에 의해 구해지는 혈류속과의 시간적분으로 용이하게 구할 수 있고, 대동맥 및 폐동맥 판류부는 원형이므로 심초음파도에서 얻어지는 직경으로 단면적을 산출할 수 있어, 도플러 심초음파법에 의한 혈류량의 측정이 가능한 것이다. 실제 분당 대동맥 및 폐동맥 판류부를 흐르는 혈류량 즉 심박출량은 단위 시간을 각 심주기의 구혈시간 ET로 하여 혈류량을 산출하고 여기에 분당 심박수 HR을 곱함으로 구할 수 있는 것이다^{2,4,15)}. 즉 심박출량을 CO라 할 때 $CO = \frac{\pi D^2}{4} \times \int_0^{ET} v(t) dt \times HR$ 의 식으로 나타낼 수 있다고 하겠다. 본 연구는 이 공식에 의해서 산출된 심박출량이 침습적인 열회석법에 의한 것과 잘 비례하는 지를 추구하여 도플러 심초음파법에 의한 심박출량 측정의 유의성을 검토하였다.

심박출량의 측정에 사용되는 도플러 심초음파법은 초기에는 연속파 도플러법이였으나 이 방법은 일정한 위치에서의 혈류속도를 선택하여 기록할 수

없는 단점 때문에 최근에는 간헐과 도플러법이 주로 사용되고 있는 실정이다. 간헐과 도플러법으로는 원하는 부위에 sample volume을 놓고 혈류속도를 기록할 수 있기 때문에 본 연구는 간헐과 도플러법을 사용하여 연구하였다. 간헐과 도플러법의 단점은 조반주파수 때문에 계측이 가능한 혈류속도에 제한이 있다는 것이지만¹³⁾, 본 연구에서는 폐동맥판이나 대동맥판에 협착이 있는 경우를 제외하고 유속이 정상범위인 경우로 제한하였으므로 이에 따른 곤란은 배제되었다^{16,17)}. 또 이와같이 간헐과 도플러법이 임상에 용이하게 응용할 수 있게 된 것은 Fourier 주파수 분석법의 도입으로 주파수 변이를 신속하게 처리할 수 있게 된 것에 힘 입은 바 크다고 하겠다¹⁸⁾, 본 연구에서는 sample volume을 위치할 때 단층심초음파도 시행 하에서 하여 원하는 부위에서 혈류속도를 정확히 기록하고자 노력하였다.

도플러 심초음파법에 의한 심박출량의 계측에 가장 큰 오차를 유발하는 요인은 단면적을 구하기 위한 판류부 직경의 측정에서 오수 있음이 지적되고 있다^{19~24)}. 이는 면적은 지름 오차의 제곱에 비례하기 때문이다. 즉 10mm 직경의 혈관에서 1mm의 오차는 33%의 면적 오차를 초래하는 것이다. 따라서 저자들은 이 오차를 줄이고자 대동맥판류 직경의 측정은 단층 심초음파도를 참고하여 M-mode법으로 시행하였으며, 폐동맥판류의 직경은 단층 심초음파도로 시행하였다. 본 연구에서 도플러로 계측한 대동맥 혈류가 폐동맥 혈류보다 열회석법에 의한 것에 좀 더 잘 비례하는 것은 실제의 판류 직경이 단층 심초음파도에서 보다 M-mode 법에서 더 정확하기 때문으로 믿어진다^{10,11,25~31)}. 대동맥은 수축기에 5~10%, 폐동맥은 2~18% 증가하므로^{32~34)}, 저자는 이와같은 변화가 훨씬 적다고 믿어지고 있는 수축초기에 직경을 계측하였다.

최대혈류속도를 구하기 위해서는 혈류방향과 도플러 beam이 평행하여 일치하여야 하나, 실제로는 각도가 생기게 되며 각도가 20° 인 경우는 cosine의 원리에 따라 6%의 오차를 초래하고, 20° 이상에서는 오차가 더욱 더 커져 수정을 요하는 것으로 지적되고 있는 것이다. 따라서 단층심음향도를 이용해서 초

음과 beam 방향과 혈류방향의 각도를 최소한으로 유지하고 이 각도를 측정해 심박출량의 값에 고려함으로써 보다 정확한 심박출량의 측정이 가능해 진다고 하겠다. 도플러법으로 심박출량을 계측할 때는 혈류속도가 혈관 내에서 일정할 필요가 있는데, 상행 대동맥 및 폐동맥의 판막 상방 수 cm까지는 혈류속도가 혈관 내에서 일정함이 보고되어 있는 터이다³⁷⁾. 그러나 Valsalva동에서의 혈류는 그 진행이 동일하지 않다고 보고되고 있으므로³⁸⁾ 저자들은 혈류의 진행이 동일한 판류부에서 혈류속도를 계측하였다.

bedside 에서 신, 간, 뇌 및 폐기능을 쉽게 측정할 수 있으나, 심기능을 측정하기란 쉽지가 않다. 심혈관계의 기능을 분석하기 위해서는 심박출량을 측정하는 것이 좋은 방법이다. 심박출량의 계측에는 여러 방법들이 고안되었는데 침습적인 방법에 direct Fick method, 열회석법, dye-dilution method, 심실 조영법 등이 있다. 열회석법의 정확도는 혈액과 injectate의 온도, injectate의 양, 도자 위치의 부정확 등에 영향을 받으며, 이 방법의 오차는 10% 미만으로 알려져 있다³⁹⁾. 그리고 현재까지 심박출량을 측정하는 가장 표준적인 방법의 하나이며, 심박출량을 측정하는 새로운 방법을 비교하는데 흔히 기준으로 받아들여지고 있는 터이다. direct Fick method는 약 10% 정도의 오차를 보이며⁴⁰⁾ 특히 저심박출 상태에서 보다 더 정확하다. 이러한 침습적인 방법들은 도자를 심장 내에 넣어야 하므로 이에 따르는 부작용, 위험성^{41,42)} 등이 있으며, 시간이 많이 소요되고, 비용이 비싸고, 임상적으로 위중한 상태에 있는 환자에서는 시행이 곤란한 경우가 있고, 일정한 시간적 간격을 두고 연속적으로 측정할 수 없다는 단점을 가지고 있다고 하겠다.

비침습적인 방법으로는 radioisotopic-dye-method⁴⁶⁾, thoracic plethysmography⁴⁷⁾, 도플러 심초음파법 등이 있는데 이중 도플러법에 의한 심박출량 측정이 관심을 받고 있는 실정이다. 심초음파에 의한 심박출량은 열회석법과 비교했을 때 좋은 상관관계를 보여주며, Bommer 등은³⁷⁾ 0.91의 상관관계를 보인다고 보고하였고, 저자들은 대동맥 혈류에서 0.98,

폐동맥 혈류에서 0.86의 상관관계를 볼 수 있었다. 그러나 저심박출상태나 빈맥이 있을 때는 오차의 범위가 넓어지는 것으로 받아들여지고 있다. 도플러 심초음파법에 의한 비침습적 심박출량의 계측은 중환자의 추구 관찰을 용이하게 하며, 심부전증 환자에서 혈관 확장제의 효과 판정⁴⁵⁾, 단락의 크기³⁶⁾와 인공심장박동기의 효과 분석⁴⁶⁾, 심독성이 있는 약제의 조기 발견 및 운동에 따른 심박출량 변화의 측정 등에 이용될수 있는 임상적으로 대단히 유용하며 정확한 방법으로 믿어지는 바인 것이다.

결 론

간헐과 도플러 심초음파법에 의한 심박출량의 비침습적 계측의 임상적 유용성을 연구하고자 25명을 대상으로 대동맥관류부 및 폐동맥 관류부에서 도플러법으로 산출한 심박출량과 열희석법에 의한 심박출량을 비교하여 각각 0.98 및 0.86의 상관계수를 보이는 것을 관찰하여 이들 값이 서로 잘 부합하는 것을 알 수 있었다. 따라서 도플러 심초음파법에 의한 심박출량의 계측은 간편하며, 환자에게 부담이 없고, 용이하게 반복검사가 가능하면서, 신뢰성이 대단히 높은 검사법이라는 것을 알 수 있었다.

REFERENCES

- 1) Nanda NC : *Doppler echocardiography, 1st ed. p 149~171, Igaku-Shoin Ltd, 1985*
- 2) Goldberg SJ, Sahn DJ, Allen HD, Valdes-cruz LM, Hoenecke H, Carnahan Y : *Evaluation of pulmonary and systemic blood flow by 2-dimensional Doppler echocardiography using fast fourier transform spectral analysis. Am J Cardiol 50 : 1394~1400, 1982*
- 3) Meijboom EJ, Valdes-cruz LM, Horowitz S, Sahn DJ, Larson DF, Young KA, Lima CO, Goldberg SJ, Allen HD : *A two dimensional Doppler echocardiographic method for calculation of pulmonary and systemic blood flow in a canine model with a variable sized left to right extracardiac shunt. Circulation 68 : 437~445, 1983*
- 4) Huntsman LL, Stewart DK, Barness SR, Franklin SB, Colocousis JS, Hessel EA : *Noninvasive Doppler determination of cardiac output in man. Circulation 67 : 593~602, 1983*
- 5) Arthur JL, Thomas AB, Kathleen H, Jeanne N, Harold LK, George AW : *The effects of sampling site on the two dimensional echo-Doppler determination of cardiac output. Am Heart J 109 : 327~331, 1985*
- 6) Chandraraina PA, Nanna M, McKay C, Nimalasuriya A, Swinney R, Elkayam U, Rahimtoola SH : *Determination of cardiac output by transcutaneous continuouswave ultrasonic Doppler computer. Am J Cardiol 53 : 234~237, 1984*
- 7) Ganz W, Donoso R, Marcus HS, Forrester JS, Swan HJC : *A new technique for measurement of cardiac output by thermodilution in man. Am J Cardiol 27 : 392~396, 1971*
- 8) Hatle L, Angelsen B : *Doppler ultra-sound in cardiology, 2nd ed. p306~320, Philadelphia, Lea & Febiger, 1985*
- 9) Goldberg SJ, Allen HD, Marx GR, Flinn CJ : *Doppler echocardiography, 1st ed. p68~91, Philadelphia, Lea & Febiger, 1985*
- 10) Gary FS, Christopher MW, John MC : *Pulsed Doppler echocardiographic assessment, including use of aortic leaflet separation, of cardiac output in children with structural heart disease. Am J Cardiol 57 : 1195~7, 1986*
- 11) Gary SF, Arthur DH, James D, Robert AO : *Accuracy of echocardiography for assessing aortic root diameter. British Heart Journal 37 : 376~8, 1975*
- 12) Baker AA, Rubinstein SA, Lorch GS : *Pulsed Doppler echocardiography principles and applications. Am J Med 63 : 69, 1977*
- 13) Angelsen AJ, Brubakk AO : *Transcutaneous*

- measurement of blood flow velocity in the human aorta. *Cardiovasc Res* 10 : 368, 1976
- 14) Stephen PS, Scott Y, Roberta GW : *Measurement of systemic and pulmonary blood flow and Qp/Qs ratio using Doppler and two-dimensional echocardiography*. *Am J Cardiol* 51 : 952~6, 1983
 - 15) Feigenbaum H : *Echocardiography*, 4th ed. p 104~111, p188~199, p413~424, Philadelphia, Lea & Febiger, 1986
 - 16) Gabe IT, Gault JH, Ross J, Mason DT, Mills CJ, Shillingford JP, Braunwald E : *Measurement of instantaneous blood flow velocity and pressure in conscious man with a catheter-tip velocity probe*. *Circulation* 40 : 603, 1969
 - 17) Greenfield JC, Harley A, Thompson HK, Wallace AG : *Pressure-flow studies in man during atrial fibrillation*. *J Clin Invest* 47 : 2411, 1968
 - 18) Bommer WJ, Miller LR, Mason DT, DeMaria AN : *Enhancement of pulsed Doppler echocardiography in the evaluation of aortic valve disease by the development of computerized spectral frequency analysis. (abstr)* *Circulation* 58(suppl II) : II~187, 1978
 - 19) Ihlen H, Amlie JP, Dale J, et al : *Determination of cardiac output by Doppler echocardiography*. *Br Heart J* 51 : 54~60, 1984
 - 20) Darsee JR, Mikolich RJ, Walter PF, Schlant RC : *Transcutaneous method of measuring Doppler cardiac output. I. Comparison of transcutaneous any juxta-aortic Doppler velocity signals with catheter and cuff electromagnetic flowmeter measurements in closed and open chest dogs*. *Am J Cardiol* 46 : 607, 1980
 - 21) Darsee JR, Walter PF, Nuttler DO : *Transcutaneous Doppler method of measuring cardiac output. II. Noninvasive measurement by transcutaneous Doppler aortic blood velocity integration and M-mode echocardiography*. *Am J Cardiol* 46 : 613, 1980
 - 22) Magnin PA, Stewart JA, Myers S, vonRunn O, Kisslo JA : *Combined Doppler and phased-array echocardiographic estimation of cardiac output*. *Circulation* 63 : 388, 1981
 - 23) Friedman MJ, Sahn DT, Larson D, Flint A : *Two-dimensional echo-range gated Doppler measurements of cardiac output and stroke volume in open chest dogs*. *Circulation* 62 : 101, 1980
 - 24) Goldberg SJ, Sahn DJ, Allen HD, Valdes-Cruz LM, Hoenecke H, Carnahan Y : *Evaluation of pulmonary and systemic blood flow by two-dimensional Doppler echocardiography using fast Fourier transform spectral analysis*. *Am J Cardiol* 1982, In press.
 - 25) Labovitz AY, Buckingham TA, Habermehl K, Nelson J, Kennedy HL, Williams GA : *The effects of sampling site on the two-dimensional echo-Doppler determination of cardiac output*. *Am Heart J* 109 : 327~332, 1985
 - 26) Valdes-Cruz LM, Horowitz S, Mesel E, Sahn DJ, Fisher DC, Larson D, Goldberg SJ, Allen HD : *Doppler echocardiographic method for calculation of pulmonary and systemic flow : accuracy in a canine model with ventricular septal defect*. *Circulation* 68 : 597~602, 1983
 - 27) Goldberg SJ, Sahn DJ, Allen HD, Valdes-Cruz LM, Hoenecke H, Carnahan Y : *Evaluation of pulmonary and systemic blood flow by 2-dimensional Doppler echocardiography using fast Fourier transform spectral analysis*. *Am Heart J* 50 : 1394~1400, 1982
 - 28) Alverson DC, Eldringe M, Dillon T, Yabek SM, Berman Jr W : *Noninvasive pulsed Doppler determination of cardiac output in neonates and children*. *J Pediatr* 101 : 46~50, 1982
 - 29) Loeppky JA, Hoskenga DE, Greene ER, Luft UC : *Comparison of noninvasive pulsed Doppler and Fick measurements of stroke volume in car-*

- diac patients. *Am Heart J* 107 : 339~346, 1984
- 30) Fisher DC, Sahn DJ, Friedman MJ, Larsen D, Valdes-Cruz LM, Horowitz S, Goldberg SJ, Allen HD : *The effects of variations of pulsed Doppler sampling site on calculation of cardiac output : an experimental study in open chest dogs.* *Circulation* 67 : 370~376, 1983
 - 31) Haites NE, McLennan FM, Mowat DHR, Rowles JM : *Assessment of cardiac output by the Doppler ultrasound technique alone.* *Br Heart J* 53 : 123~129, 1985
 - 32) Bartlett GO, Maalos AJ, Shapiro A : *Relationship of aortic pressure and diameter in the dog.* *J Appl physiol* 16 : 545~548, 1961
 - 33) Greenfield JC, Palel DJ : *Relation between pressure and diameter in the ascending aorta of man.* *Circ Res* 10 : 778~781, 1962
 - 34) Greenfield JC, Griggs DM : *The relation between pressure and diameter in main pulmonary artery of man.* *J Appl Physiol* 18 : 557~559, 1963
 - 35) Steingart RM, Meller J, Barovick J, Patterson R, Herman MV, Telchholz LE : *Pulsed Doppler echocardiographic measurement of beat to beat changes in stroke volume in dogs.* *Circulation* 62 : 542~548, 1980
 - 36) Kitabatake A, Inoue M, Asao M, et al : *Noninvasive evaluation of the ratio of pulmonic to systemic flow in atrial septal defect by duplex Doppler echocardiography.* *Circulation* 69 : 73, 1984
 - 37) Bommer W, Miller L, Keoun M, Mason DJ, Demaria AN : *Real time fast Fourier analysis of Doppler spectral information and two dimensional echocardiography yield a noninvasive estimate of cardiac output (abstr).* *Circulation* 62 : Suppl III : III~199, 1980
 - 38) Rushmer RF : *Cardiovascular dynamics.* 4th ed. Philadelphia, London, Toronto : WB Saunders, 411~45, 1976
 - 39) Levitt JM, Replogle RL : *Thermodilution cardiac output : a critical analysis and review of the literature.* *J Surg Res* 27 : 392, 1979
 - 40) Braunwald E, ed : *Heart disease-a textbook of cardiovascular medicine.* Philadelphia : WB Saunders, 1980
 - 41) Barry WH, Grossman W : *Cardiac catheterization.* In *heart disease : A textbook of cardiovascular medicine*, edited by Braunwald E. Philadelphia, WB Saunders p 299~300, 1980
 - 42) Mitchell WA : *Cardiac and coronary artery catheterization in adults.* In *complications and legal implications of radiologic special procedures*, edited by Meaney TF, Lalli AF, Alfidi RJ, St Louis, CV Mosby, p120~133, 1973
 - 43) Berman DS, Salel AF, Denardo GL, Bell GB, Scheibe PO, Jackson PE, Mason DT : *A new constant infusion radioisotopic technique for the non-invasive determination of cardiac output.* *Med Instr* 10 : 195~204, 1976
 - 44) Kubicek WG, Karnegis JM, Patterson RP, Witsoe DA, Mattson RH : *Development and evaluation of an impedance cardiac output system.* *Aerospace Med.* 37 : 1208~1212, 1966
 - 45) Elkayam U, Gardin JM, Berkley R, et al : *The use of Doppler flow velocity measurement to assess the hemodynamic response to vasodilators in patients with heart failure.* *Circulation* 67 : 377, 1983
 - 46) Stewart WJ, Dicola VC, Harthorne JW, et al : *Doppler ultrasound measurement of cardiac output in patients with physiologic pacemakers : Effects of left ventricular function and retrograde ventriculoatrial conduction.* *Am J Cardiol* 54 : 308, 1984