

심실중격결손 환자에서 Doppler 심초음파와 심도자로 측정된 폐혈류(Qp), 체혈류(Qs), Qp/Qs 비율의 비교 관찰

경희대학교 의과대학 소아과학교실 · 내과학교실*

차성호 · 안창일 · 배종화*

= ABSTRACT =

Comparison of Two-Dimensional Doppler Echocardiography and Fick Method with Cardiac Catheterization of Qp, Qs and Qp/Qs Ratio in Ventricular Septal Defect in Children

Sung Ho Cha, M.D., Chang Il Ahn, M.D. and Jong Hoa Bae, M.D.*

Department of Pediatrics and Internal Medicine, School of Medicine,
Kyung Hee University*

This study was performed to compare the amount of blood flow from left and right side heart using Doppler echocardiography and Fick method. The pulmonary blood flow (Qp), aortic blood flow (Qs) and Qp/Qs ratio were noninvasively evaluated by two dimensional Doppler echocardiography in 10 patients with ventricular septal defect in children, aged 2 years to 15 years (mean \pm SD = 7.1 ± 4.9 years). Cardiac catheterization was performed within 2 days after examination of Doppler echocardiography in all patients. Systemic and pulmonary blood flow was calculated by using Fick principle, based on measured oxygen consumption and measured blood oxygen saturation. The Doppler frequency shift was analyzed by computer system combined with Meridian Echocardiography System. Comparison of Qp, Qs and Qp/Qs ratio obtained by invasive methods and by two-dimensional pulsed wave Doppler echocardiography showed a correlation of 0.679 in Qp, 0.710 in Qs and 0.639 in Qp/Qs ratio ($p < 0.05$).

Key Words: Doppler echocardiography. Aortic blood flow. Pulmonary blood flow.
Ventricular septal defect. Cardiac catheterization.

서 론

Doppler를 이용한 심초음파는 비관혈적인 진단 도구로서 선천성 심장 질환뿐만 아니라, 후천성 심

장 질환의 정확한 진단 및 혈역학적인 관계까지 상세히 알 수 있게 되었고, 비교적 짧은 시간에 방사선 조사의 위험과 관혈적인 방법에 의한 위험없이 진단 및 혈역학적인 상황을 알 수 있게 되었다. 많은 보고들이 단락이 있는 선천성 심질환자에서 2

면성 심초음파와 Doppler 심초음파가 혈류를 측정하는데 비관혈적으로 간단히 그리고 정확한 결과를 얻을 수 있는 검사법으로 유용하게 이용되고 있다¹⁻⁹⁾.

저자는 Doppler 심초음파를 이용한 체혈류(Qs) 폐혈류(Qp), 그리고 그비율(Qp/Qs)을 측정하여 심도자를 이용하여 얻은 각 심방실 및 혈관의 산소 농도를 Fick방법에 의해 계산된 혈류 결과 사이의 상관 관계를 알고자 연구를 시행하였다.

대상 및 방법

1) 대 상

환아의 대상은 1986년 3월부터 8월까지 경희대학교 부속병원 소아과에 수술을 받기 위해 입원한 선천성 심장 질환자중 복잡 심장 기형이나 동맥관 개존증 또는 일차적으로 심장 판막에 병소가 없었던 심실중격결손증 환자 10명을 대상으로 하였다. 환아는 2세부터 15세 (평균 연령 \pm SD : 7.1 \pm 4.9세)였고 남아가 4명 여아가 6명이였다.

2) 심초음파 검사

M형 심초음파, 2면성 심초음파 및 Doppler 심초음파는 Meridian Echocardiographic system (Johnson and Johnson)을 이용하였으며 M형 및 2면성 심초음파의 변환기는 3MHz을 이용하였으며 환아는 좌상위위로 위치시켜 놓고 panasonic AG-6200 video에 녹화하였다. 대동맥 내경을 측정하기 위해 흉골연장축단면도 (parasternal long axis view)에서 수축기시에 대동맥동 (aortic sinus)의 바로 윗부분의 대동맥 내경을 3회 측정하였으며, 측정 방법은 Meridian Echocardiographic System을 이용하였다 (Fig. 1). 또한 심첨5방단면도 (apical five chamber view)에서 수축기시의 대동맥 내경을 대동맥궁 직상방에서 3회 측정하여 (Fig. 2) 흉골연장축단면도에서 얻은 대동맥 내경과 평균치를 구하여 대동맥 내경으로 하였다.

폐동맥 내경을 측정하기 위해 흉골연단축단면도 (parasternal short axis view)에서 수축기시의 폐동맥 내경을 각 frame마다 3회 측정하여 그 평

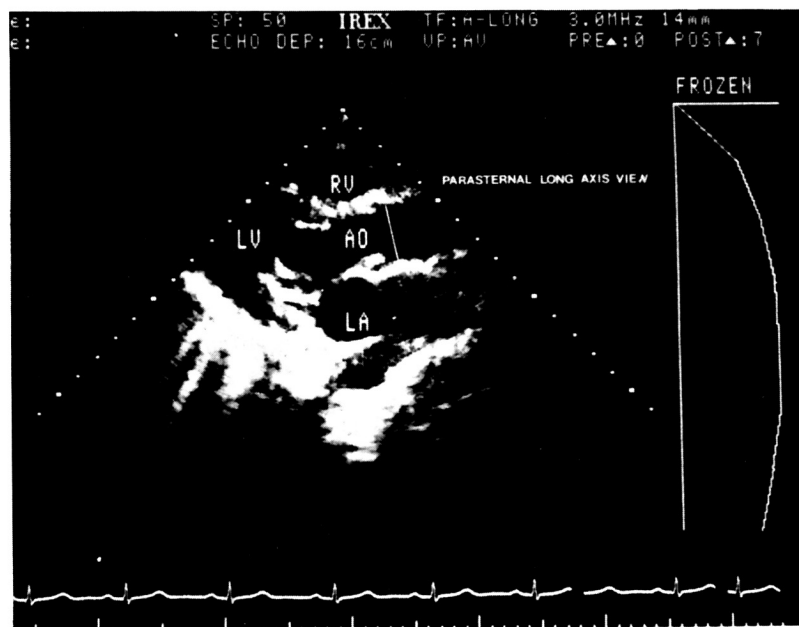


Fig. 1. Parasternal long axis view used for measuring the diameter of the aorta in systole. (RV: Right Ventricle, LV: Left Ventricle, AO: Aorta, LA: Left Atrium)

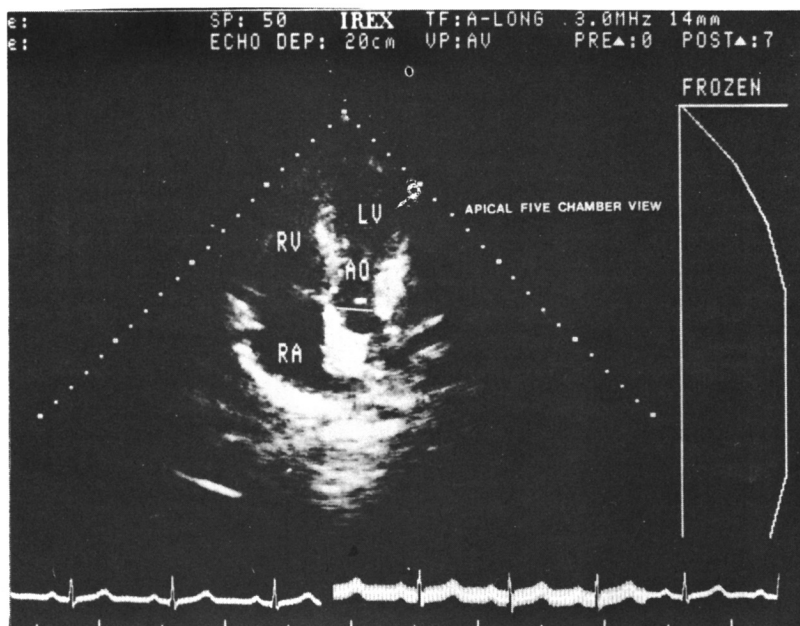


Fig. 2. Apical five chamber view used for measuring the diameter of aorta in systole.
(RV: Right Ventricle, LV: Left Ventricle, AO: Aorta, RA: Right Atrium)

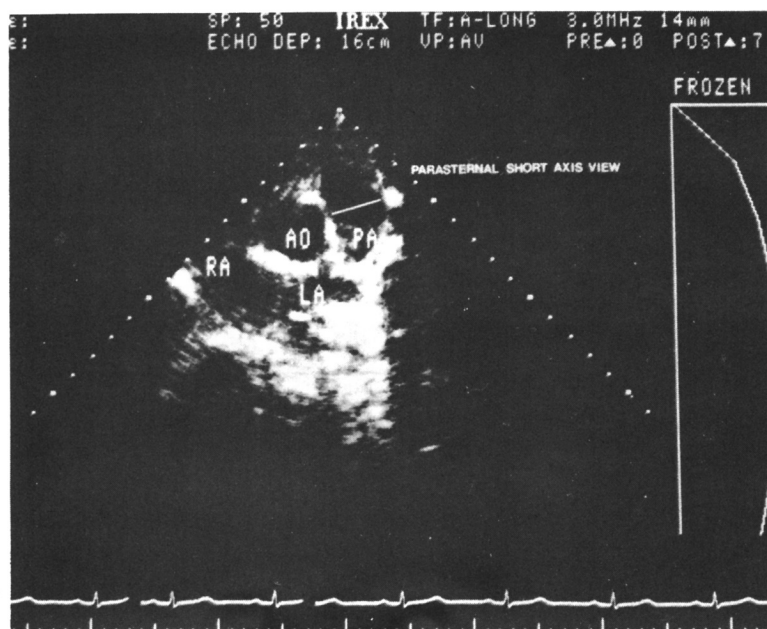


Fig. 3. Parasternal short axis view used for measuring the diameter of the main pulmonary artery in systole.
(RA: Right Atrium, LA: Left Atrium, AO: Aorta, PA: Pulmonary Artery)

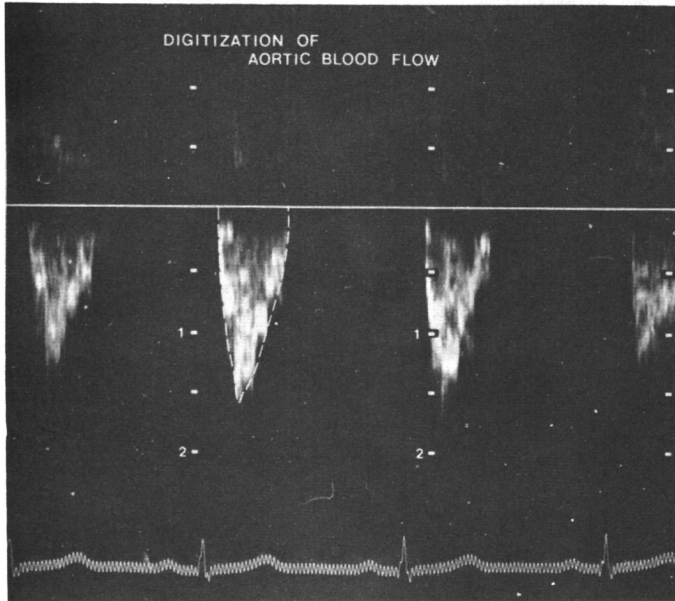


Fig. 4. Apical five chamber view of aorta. Velocity of systolic aortic blood flow is displayed away from transducer. Dashed lines indicate area under curve integrated.

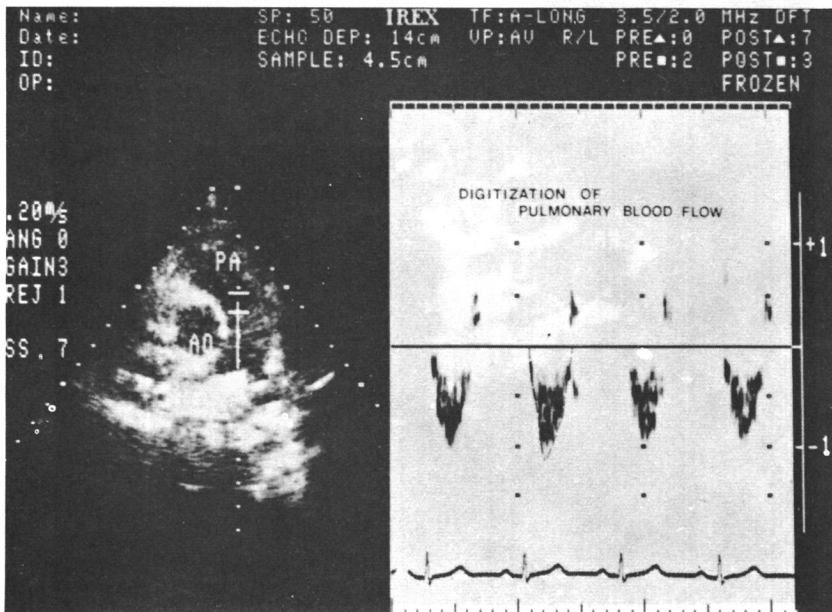


Fig. 5. Parasternal short axis view of pulmonary artery with sample volume in the main pulmonary artery. Systolic pulmonary velocity is displayed away from the transducer. Dashed lines indicate area under curve integrated. (PA: Pulmonary Artery, AO: Aorta)

균치를 폐동맥 내경으로 하였으며(Fig. 3), 측정 방법은 대동맥 내경 측정 방법과 동일 하였다.

3) Doppler 심초음파 검사

간혈파형 Doppler 심초음파와 연속파 Doppler 심초음파가 합쳐져 있는 3.5/2.0 MHz 변환기를 이용하여 각 혈류의 방향과 그 속도를 측정하여 panasonic AG-6200 video 에 녹화하였다. 대동맥 혈류 측정은 심첨 5방단면도에서 내경 측정시 이용되었던 부위에 간혈파형 Doppler 심초음파를 이용하여 sample volume을 위치시켜 대동맥의 혈류 속도 및 크기를 기록하였다(Fig. 4).

폐동맥의 혈류 측정은 흉골연단축단면도에서 간혈파형 Doppler 심초음파를 이용하여 폐동맥 내경을 측정하였던 부위에 sample volume을 위치시켜 그 혈류의 속도와 크기를 측정하였다(Fig. 5).

4) Doppler 분광상(spectrum)의 계산

녹화된 video로 부터 각 환자의 Doppler 분광상의 크기는 Doppler 기계의 부착된 computer system을 이용하여 digitization하였으며(Fig. 4, Fig. 5), 동시에 incidental angle을 20° 이내로 유지시키면서 sample volume의 깊이를 입력시키고 환자의 체중, 신장, 각혈관의 내경 및 심박동수를 입력시키므로써 자동적으로 각 혈관의 박출량

(stroke volume), 박출량계수(stroke volume index) 및 단위 체표 면적당 혈류의 양이 계산되었다.

5) Fick 방법

Doppler 심초음파를 시행한후 최소한 2일 이내 심도자를 시행하였으며 각 심방실 및 혈관의 산소 농도를 측정하여 Fick 방법에 의해 체혈류 및 폐혈류의 양을 구하였다. 심도자시 사용된 약제는 시술 전에 demerol과 chlorpromazine을 투여하였고 필요에 따라 lidocaine을 국소 마취에 사용했고 필요에 따라 ketamine을 투여하였다. 심부전이 있었던 환자에서는 심도자를 시행하기 2일전에 digoxin 투약을 중지하였다.

6) 통계 처리

Doppler 심초음파와 Fick 방법으로 산출된 체혈류와 폐혈류 그리고 그 비율의 비교는 최소자승법(method of least square)으로 회기 방정식을 산출하였으며 상관계수는 승적평균법(mean sum-product method)로 구하였고 두군의 비교는 T검정을 하여 p-value를 구하였다.

결 과

1) 심실중격결손 환자의 성별 및 Doppler 심초

Table 1. Doppler echocardiographic diagnosis and Qp, Qs and Qp/Qs ratio

| Case | Age (yr) | Sex | DE DX | Qp | Qs | Qp/Qs |
|------|----------|-----|--------------|-------|------|-------|
| 1 | 2 | F | VSD MI PI | 16.21 | 5.30 | 3.06 |
| 2 | 6 | M | VSD MI PI TI | 26.43 | 6.54 | 4.04 |
| 3 | 9 | F | VSD | 15.16 | 6.74 | 2.25 |
| 4 | 9 | F | VSD TI | 11.45 | 5.34 | 2.14 |
| 5 | 9 | M | VSD | 8.12 | 4.15 | 1.96 |
| 6 | 2 | F | VSD | 4.60 | 3.92 | 1.17 |
| 7 | 13 | M | VSD PI | 8.06 | 5.80 | 1.39 |
| 8 | 6 | F | VSD | 4.05 | 3.37 | 1.20 |
| 9 | 2 | M | VSD | 11.61 | 2.96 | 3.92 |
| 10 | 15 | F | VSD | 6.82 | 5.22 | 1.31 |

Qp: Pulmonary Blood Flow, Qs: Aortic Blood Flow, VSD: Ventricular Septal Defect, MI: Mitral Insufficiency, PI: Pulmonary Insufficiency, TI: Tricuspid Insufficiency, AI: Aortic Insufficiency, DE: Doppler Echocardiography

Table 2. Cardiac catheterization findings calculated by Fick methods in patients with VSD

| Case | Qp | Qs | Qp/Qs | MPA Pressure(mean) mmHg |
|------|-------|------|-------|-------------------------|
| 1 | 17.11 | 5.70 | 3.00 | 85/35 (60) |
| 2 | 13.33 | 4.33 | 3.08 | 88/42 (65) |
| 3 | 7.84 | 6.74 | 1.16 | 30/15 (18) |
| 4 | 13.13 | 4.15 | 3.16 | 40/15 (25) |
| 5 | 8.35 | 4.19 | 1.99 | 29/14 (20) |
| 6 | 4.36 | 3.31 | 1.32 | 26/10 (14) |
| 7 | 6.99 | 5.46 | 1.28 | 40/10 (17) |
| 8 | 3.84 | 3.64 | 1.05 | 20/ 6 (12) |
| 9 | 7.16 | 4.01 | 1.79 | 38/14 (22) |
| 10 | 5.49 | 4.46 | 1.23 | 32/10 (20) |

Qp: Pulmonary Blood Flow, Qs: Aortic Blood Flow, MPA: Main Pulmonary Artery, VSD: Ventricular Septal Defect

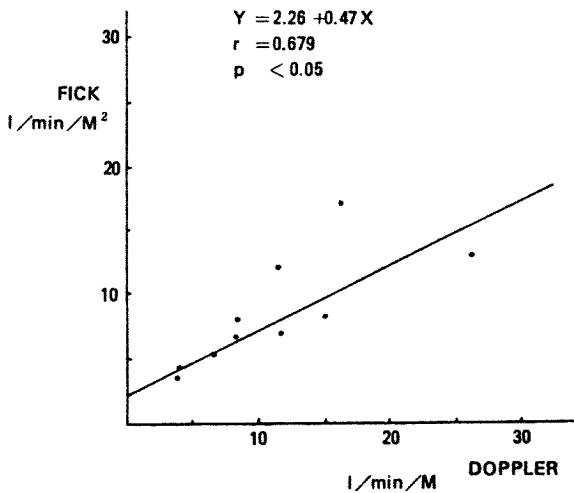


Fig. 6. Results of Doppler pulmonary blood flow are compared with pulmonary blood flow determined by invasive methods.

음파를 이용한 진단

10 명의 심실중격결손 환자의 연령은 2세부터 15 세 (평균 \pm SD : 7.1 ± 4.9 세) 였고 남아 4 명 여 아는 6 명이였다. 1 번 환자에서는 승모판 및 폐동맥판의 폐쇄부전이 동반되었고, 2 번 환자에서는 승모판막과 삼첨판막 및 폐동맥판막에 폐쇄부전이 동반되었다. 이밖에 4 번 환자와 7 번 환자에서 동

반된 판막폐쇄부전은 도표와 같다 (Table 1).

2) Fick 방법으로 계산된 심도자법의 결과

Doppler 심초음파를 시행한 후 최소한 2 일이내에 심도자를 시행하였다. Fick 방법 에 의해 산출한 각 혈류의 양은 도표와 같으며 (Table 2), 1 번과 2 번 환자에서 평균 폐동맥압은 각각 60 mmHg, 65 mmHg 의 폐동맥 고혈압이 있었으며 이런 환자의 Doppler 심초음파 소견에서도 폐동맥판폐쇄부전을 나타냈다.

3) 폐동맥 혈류 (Qp)

Doppler 심초음파로 측정된 Qp 와 Fick 방법으로 계산된 Qp 사이의 상관계수는 0.679 로 서로 유의한 상관 관계 ($p < 0.05$) 가 있었다 (Fig. 6).

4) 대동맥 혈류 (Qs)

Doppler 심초음파로 측정된 Qs 와 Fick 방법으로 계산된 Qs 사이의 상관계수는 0.710 로 서로 유의한 상관 관계 ($p < 0.05$) 가 있었다 (Fig. 7).

5) Qp/Qs 비율

Doppler 심초음파로 측정된 Qp/Qs 비율과 Fick 방법으로 계산된 Qp/Qs 비율 사이의 상관계수는 0.639 로 서로 유의한 상관관계 ($p < 0.05$) 가 있었다 (Fig. 8).

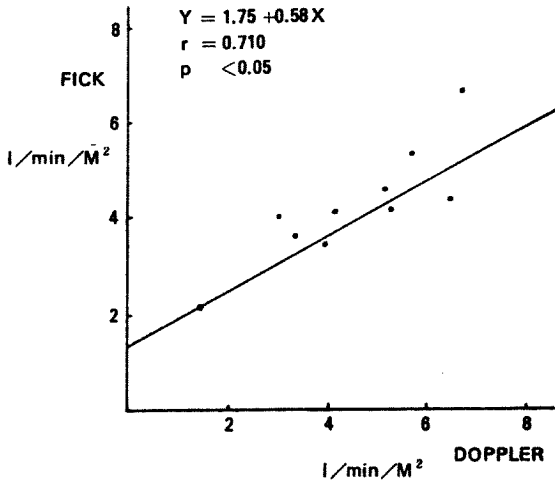


Fig. 7. Results of Doppler aortic blood flows are compared with aortic blood flow determined by invasive methods.

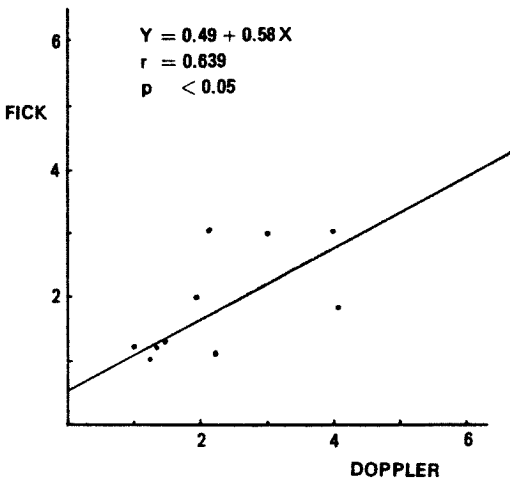


Fig. 8. Results of Doppler Qp/Qs ratio are compared with Qp/Qs ratio determined by invasive methods.

고 안

최근 Doppler 심초음파의 임상적 이용으로 좌심실 기능의 지표가 되는 심박출량의 양적인 측정이 이루어져 왔으며^{3, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15}, 더불어 선천성 심장 질환에 있어 단락으로 인한 우심실 및 좌심실의 심박출량의 차이를 비관혈적인 방법으로 계

산하게 되었고 이 결과에 대한 유용성의 여부를 심도자에 의한 Fick 방법으로 계산된 결과와 비교 검토하여 상관 관계가 좋은 결과를 보여 주었다^{1, 2, 4, 5, 6, 8, 9}. 그러나 우리나라에서 Doppler 심초음파의 이용은 1980 년대에 비로서 임상에 이용되었고 이것을 이용한 보고도 미비하였다.

심박출량의 측정은 심혈관계 기능을 평가하는데 가장 중요한 생리적 지표가 되고 이것으로부터 환자의 임상 상태, 예후 및 치료 방향 설정에 도움이 되는 것이다¹⁶. 따라서 간단하고 비관혈적인 방법으로 심박출량을 측정하고 그 심박출량의 변화를 평가하는 것은 매우 중요한 것이다. 이러한 것을 만족시켜주는 진단 방법이 Doppler 심초음파이며 이에 대한 신뢰도를 평가하기 위해 많은 보고가 발표되었다^{1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 17}.

좌심실 또는 우심실의 심박출량을 알기 위해 혈류가 지나는 혈관의 단면적, Doppler 분광상의 총면적(velocity integral), 및 심박수를 알면 심박출량을 구할 수 있다^{10, 17, 18, 19}. 이러한 등식을 임상적으로 적용하기 위해서는 대동맥 혈류가 uniform 하고 rigid tube 라는 가정하에서 적용되는데 실제로 대동맥은 expansile 하여 수축기에 대동맥의 단면적은 5~10%²¹, 3~12%¹², 대동맥 내경의 변화는 11~17%¹² 정도 변화한다고 하며, 대동맥 내경을 어디서 측정하였느냐에 따라 단면적의 증가는 10%^{17, 20} 에서 변한다고 한다. 또한 대동맥 판막으로 인해 혈류의 와류(turbulence)가 형성되고 대동맥의 모양이 noncylindrical 하기 때문에 부위별로 속도가 다양하다²¹. 예를 들면 대동맥 기시부의 내측굴곡부(inner curvature)에서 혈류가 제일 빠르며, 더 올라가면서 외측굴곡부(outer curvature)에서 혈류가 더 빠르다²⁰. 이러한 특성이 Doppler 을 이용한 혈류 측정의 문제점으로 대두되고 있는 것이다. 또한 혈류의 속도를 정확히 측정하기 위해서는 혈류의 방향과 Doppler beam 의 방향이 일치되어야 하며^{10, 17, 18, 19}, 그 각도가 20° 이내인 경우 그 오차는 6% 이내로 비교적 작지만 20° 이상인 경우 정확한 혈류의 속도를 측정할 수 없는 것이다^{10, 17, 19}.

이러한 문제점에 대한 보고로 상행대동맥 또는 하행대동맥의 여러 부위에서 sample volume 을 위치시켰을 때 계산된 혈류의 속도 측정 차이는 의미있는 차이를 보이지 않았다¹⁶⁾.

이면성 심초음파와 간혈파형 심초음파를 동시에 이용하므로 range gating을 할 수 있고 sample volume의 방향 설정을 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 혈류의 방향을 정확히 알 수 없으므로 최대로 기록되는 Doppler 이동(shift)을 찾아야 하는 것이다. 간혈파형 심초음파의 단점으로는 “range - velocity product”가 유발되는데 이것은 sample volume의 깊이와 최대 속도 사이에 반비례한다는 것이며, 연속파 Doppler 심초음파에서는 이러한 양상이 없다. 그러나 실제적으로 간혈파형 심초음파를 이용하여 심박출량을 계산하는 데는 큰 문제점은 없다^{16, 17)}.

심박출량을 계산하는데 있어 대동맥의 내경을 측정하는 방법은 여러가지가 있는데, A형, M형 및 이면성 심초음파가 모두 이용되나 가장 신뢰도가 높은 것은 이면성 심초음파이다¹⁷⁾. 상행대동맥을 볼 수 있는 부위는 심첨부, 흉골상와(suprasternal notch), 또는 늑골하부(subcostal)에서 볼 수 있다. 심첨부에서 보는 경우는 incidental angle이 크며 대부분의 사람들은 흉골상와에서 측정하는 것이 incidental angle을 낮출 수 있다¹⁹⁾. 이밖에 심박출량을 측정하는 부위로는 이완기시 승모판막을 지나는 Doppler 분광상을 이용하기도 하고^{7, 11)} 흉골연장축단면도, 또는 늑골하부(subcostal)에서 볼 수 있다. 대동맥 내경을 실제 크기보다 2mm 정도 더 크게 측정할 경우 심박출량은 14% 더 계산되고, 이 2mm가 대동맥벽의 wall echo이기 때문에 측정 부위를 결정하는 것도 매우 중요하다¹⁷⁾. 대동맥 혈류의 속도는 판막이 있는 부위에서 측정하여야 하나 대동맥 판막 운동으로 인하여 혈류가 disturb 되기 때문에 판막에서 약간 상방에서 측정하여야 하고 그 중 가장 빠른 속도를 택하여야 하는데 그 이유는 그것이 aortic orifice의 속도를 반영하기 때문이다¹⁷⁾. 대부분의 환자에서, 하행대

동맥에서 적절한 혈류의 속도를 측정할 수 있으나 상행대동맥에서 측정된 값이 더 좋으며, 하행대동맥에서 측정된 혈류를 평가하는데 문제점은 하행대동맥의 내경을 측정하는데 어려움이 있다는 것이다^{17, 22)}.

반면에 하행대동맥에서 혈류를 측정하는 것은 기술적으로 쉽고¹⁸⁾, Labovitz²²⁾ 등은 하행대동맥에서 심박출량을 만족스럽게 측정하였으나 상당량의 혈액이 대혈관으로 나가 버리기 때문에 이론적으로 심박출량을 반영하기는 어렵다.

일반적으로 상행대동맥에서 이면성 심초음파를 이용하여 대동맥 내경이 가장 좁으며 Valsalva sinus의 바로 상방에서 측정하고^{10, 12)}, 이밖에 aortic root를 이용한다^{1, 2, 13, 18, 23)}.

저자는 흉골연장축단면도와 심첨 5방단면도에서 대동맥 내경을 측정하고, 심첨 5방단면도에서 내경을 측정하였던 부위에 sample volume을 위치시켜 대동맥의 혈류를 측정하였다.

폐동맥 혈류도 마찬가지로 방법으로 계산되는데, 폐동맥 내경은 흉골연장축단면도에서 가장 잘 측정할 수 있으며 정확한 폐동맥 내경을 측정하는 것이 정확한 것이 정확한 폐혈류의 양을 산출할 수 있는 열쇠가 되는 것이다^{14, 5)}. 또한 폐동맥은 수축과 이완에 따라 그 직경이 심하게 변화되는데 그 단면적은 2~18%²⁾ 범위에서 변하며, 혈류를 측정할 때는 가장 큰 직경을 재어야 한다. 여기서 sample volume의 위치는 폐동맥 판막 가까운 부위의 폐동맥 또는 우심실유출로(right ventricular outflow tract)에 위치시킨다.

환자 선정시 동맥관 개존증이 없어야 하며 이러한 경우 Qp와 Qp/Qs 비율이 더 적게 계산될 수 있으며, 반월판막에 폐쇄부전이 동반되는 경우 역류된 혈류의 양을 측정하지 못해서 혈류의 양이 더 많이 계산될 수가 있다. 또한 판막협착증이 동반되면 와류가 생기고 협착으로 인한 빠른 혈류의 속도로 인해 signal aliasing과 spectral broadening을 유발하므로 적어도 이런 상황은 포함하지 말아야 정확한 혈류의 양을 측정할 수 있는 것이다²⁾. 다

른 보고의 상관 관계에 비해 저자의 상관 관계가 낮은 이유로는 1, 2, 4, 7번의 환자에서 판막폐쇄부전이 동반되어 Doppler 검사 소견이 Fick 방법에 의한 결과보다 특히 Qp가 더 높게 측정된 것으로 사료된다.

대부분의 보고에서 Doppler 심초음파와 Fick방법 사이에 좋은 상관 관계를 보여 주었으나^{1, 2, 4, 5, 6, 8, 9)}, Doppler을 이용한 혈류의 측정가 indicator dilution method²⁴⁾ 또는 thermodilution²⁵⁾ method로 측정된 혈류사이의 상관 관계는 문제점이 많다. 이런 문제점이 생기는 것은 무엇이라고 단정지을 수 없으나 환자의 선정, 내경 측정의 방법, Doppler 변환기의 크기, 시술자의 경험, Doppler 기계의 감수도등 여러 복합적 원인이 관여한다¹⁷⁾.

저자의 결과에서 Doppler을 이용한 진단과 혈역학적인 소견 및 Fick 방법과 유의한 상관 관계를 보이거나 아직 논쟁의 여지가 있는 부분도 있으므로 비혈관적인 시술의 Dopple 심초음파에 대한 지속적인 연구 및 검토가 필요한 것으로 생각된다.

REFERENCES

- 1) Goldberg SJ, Sahn DJ, Allen Hd, Valdes-cruz LM, Hoenecke H and 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
- 2) Sanders SP, Yeager S and Williams RG: *Measurement of systemic and pulmonary blood flow and Qp/Qs ration using Doppler and two-dimensional echocardiography.* Am J Cardiol 51: 952-956, 1983
- 3) Loeppky JA, Hoekenga DE, Greene ER and Luft UC: *Comparison of noninvasive pulsed Doppler and Fick measurements of stroke volume in cardiac patients.* Am Heart J 107: 339-346, 1984
- 4) Kitabatake A, Inoue M, Asao M, Ito H, Masuyama T, Tanouchi J, Morita T, Hori M, Yoshima H, Ohnishi K and Abe H: *Noninvasive evaluation of the ratio of pulmonary to systemic flow in atrial septal defect by duplex Doppler echocardiography.* Circulation 69: 73-79, 1984
- 5) Kasper W, Treese N, Pop T and Meinertz: *Diagnosis of increased pulmonary blood flow by suprasternal M-mode echocardiography in atrial septal defect.* Am J Cardiol 52: 1272-1274, 1983
- 6) Valdes-cruz LM, Horowitz S, Mesel E, Sahn DJ, Fisher DC and Larson D: *A pulsed Doppler echocardiographic method for calculating pulmonary and systemic blood flow in atrial level shunts: validation studies in animals and initial human experience.* Circulation 69: 80-86, 1984
- 7) Zhang Y, Nitter-hauge S, Ihlen H and Myhre E: *Doppler echocardiographic measurment of cardiac output using the mitral orifice method.* Br Heart J 53: 130-136, 1985
- 8) Valdes-cruz LM, Horowitz S, Mesel E, Sahn DJ, Fisher DC, Larson D, Goldberg SJ and Allen HD: *A pulsed Doppler echocardiographic method for calculation of pulmonary and systemic flow: accuracy in a canine model with ventricular septal defect.* Circulation 68: 597-602, 1983
- 9) Meijboom EJ, Valdes-cruz LM, Horowitz S, Sahn DJ, Larson DF, Young KA, Lima CO, Goldberg SJ and 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
- 10) Nishimura RA, Miller FA, Callahan MJ, Benassi RC, Seward JB and Tajik JT: *Doppler echocardiography: theory, instrumentation, technique, and application.* Mayo Clin Proc 60: 321-343, 1985
- 11) Fisher DC, Sahn DJ, Friedman MJ, Larson D, Valdes-curz LM, Horowitz S, Goldberg SJ and Allen HD: *The mitral valve orifice method for noninvasive two-dimensional echo Doppler detrminations of cardiac output.* Cir-

- culation* 67: 872-877, 1983
- 12) Huntsman LL, Stewart DK, Barnes SR, Franklin SB, Colocousis JS and Hessel EA: *Noninvasive Doppler determination of cardiac output in man*, *Circulation* 67: 593-602, 1983
 - 13) Inlen H, Amlie JP, Dale J, Forfang K, Nitterhauge S, Otterstad JE, Simonsen S and Myhre E: *Determination of cardiac output by Doppler echocardiography*. *Br Heart J* 51: 54-60, 1984
 - 14) Haites NE, Mc Lennan FM, Mowat DHR and Rawles JM: *Assessment of cardiac output by the Doppler ultrasound technique alone*. *Br Heart J* 53: 123-129, 1985
 - 15) Huntsman LL, Gams E, Johnson CC and Fairbanks E: *Transcutaneous determination of aortic blood-flow velocities in man*. *Am Heart J* 89: 605-612, 1975
 - 16) Nanda NC: *Doppler echocardiography*, 1st Ed p149-171, Igaku-Shoin Ltd, 1985
 - 17) Hatle L and Angelsen B: *Doppler Ultrasound in cardiology*, 2nd Ed, p306-320, Philadelphia, Lea & Febiger, 1985
 - 18) Feigenbaum H: *Echocardiography*, 4th Ed, p104-111, p188-199, p413-424, Philadelphia, Lea & Feber, 1986
 - 19) Goldberg SJ, Allen HD, Marx GR and Flinn CJ: *Doppler echocardiography*, 1st Ed, p68-91, Philadelphia, Lea & Febiger, 1985
 - 20) Greenfield JC and Patel DJ: *Relation between pressure and diameter in the ascending aorta of man*. *Circ Res* 10: 778-781, 1962
 - 21) Seed WA, and Wood NB: *Velocity patterns in the aorta*. *Cardiovasc Res* 5: 319-330, 1971
 - 22) Labovitz AJ: *The effects of sampling site on the two-dimensional echo-Doppler determination of cardiac output*. *Am Heart J* 109: 327-332, 1985
 - 23) Francis GS, Hagan AD, Oury J and O'Rourke RA: *Accuracy of echocardiography for assessing aortic root diameter*. *Br Heart J* 37: 376-378, 1975
 - 24) Touche T, Vervin P, Curien N, Merillon JP and Gourgon R: *Cardiac output measurement in adult patients with combined pulsed Doppler and two-dimensional echocardiography*. *Circulation* 66: II-121, 1982(abstracts)
 - 25) Waters J, Kwan OL, Kerns G, Takeda P, Low R, Booth D and DeMaria A: *Limitations of Doppler echocardiography in the calculation of cardiac output*. *Circulation* 66: II-122, 1982(abstracts)