

Laboratory Examination of Congenital Heart Disease

보라매 병원 소아과 김 호 성

선천성 심질환의 진단에 있어서 가장 기본이 되는 기술은 병력의 청취와 이학적 검사이다. 그리고 이러한 기본 술기에 바탕을 두고 여러가지 진단 도구들을 이용하여 보다 정밀한 진단을 할 수 있다. 선천성 심질환의 진단 및 치료에 이용되는 기술 내지 도구들은 다음과 같은 것들이 있다.

1. Electrocardiography
 - 1) Routine electrocardiography
 - 2) Ambulatory electrocardiography
2. Exercise test
3. Non-invasive imaging tools
 - 1) Chest X-rays
 - 2) Echocardiography
 - 3) Computed tomography (CT)
 - 4) Magnetic resonance imaging (MRI)
 - 5) Positron emission tomography (PET)
 - 6) Radionuclide methods
4. Invasive procedures
 - 1) Cardiac catheterization and Angiocardiography
 - 2) Catheter intervention procedures

1. Electrocardiography (심전도)

심전도는 심장에 흐르는 전기적 신호를 체표에서 기록한 것이다. 이 심전도는 흉부 방사선 사진과 심초음파와 더불어 소아의 선천성 심질환의 진단에 이용되는 가장 기본적인 도구이다. 심전도를 통하여 심방과 심실의 확장이나 비대에 대하여 알 수 있으며 부정맥의 양상을 확인할 수 있다. 심전도는 이용 방법에 따라서 routine electrocardiography(일반 심전도)와 ambulatory electrocardiography(24시간 심전도)로 나눌 수 있다.

1) Routine electrocardiography (일반 심전도)

심전도에서 1회의 심박동 시에 3개의 편향(deflection)이 나오며 각각을 P파, QRS complex, T파라고 부른다.

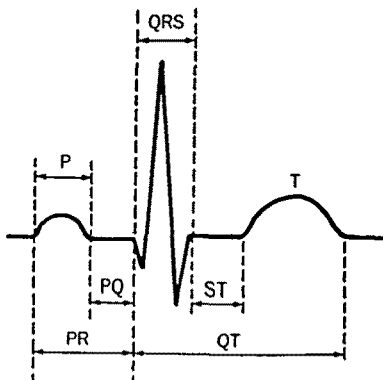
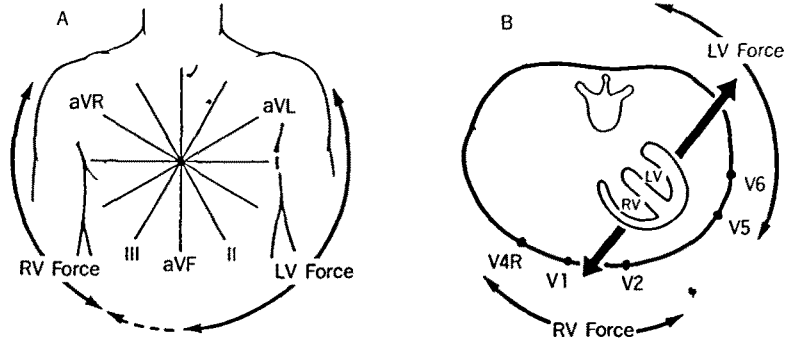


Diagram illustrating important intervals(or durations) and segments of an ECG cycle.



Diagrammatic representation of left and right ventricular forces on the frontal projection or hexaxial reference system (A) and the horizontal plane (B). (From Park MK, Guntheroth WG: *How to read pediatric ECGs*, ed 3, St Louis, 1992, Mosby.)

이중 P파는 심방의 분극(depolarization)시에, QRS complex는 심실의 분극시에, 그리고 T파는 심실의 재분극(repolarization)시에 나타나며 심방의 재분극은 대개 QRS complex와 겹치기 때문에 확인되지 않는다. 이러한 편향들을 체표의 서로 다른 곳에서 기록하여 개개의 파(wave)와 이들의 상호 관계에 대한 입체적인 정보들을 얻을 수 있다. 심전도에서는 다음과 같은 것들을 분석하여 정보를 얻는다.

- rhythm (sinus or nonsinus)
- heart rate (atrial and ventricular rates, if different)
- P axis, QRS axis, T axis
- intervals: PR, QRS, QT
- P wave amplitude and duration
- QRS amplitude and R/S ratio, abnormal Q waves
- ST segment and T wave abnormalities

① rhythm : 각각의 P파에 QRS complex가 항상 일정한 간격으로 나타나오면 동성맥(sinus rhythm)으로 생각할 수 있다. 이때 반드시 정상 PR interval과 정상 P axis일 필요는 없다.

② rate : 몇가지 방법을 통하여 분방 심박수를 산출할 수 있다.

③ P axis : 심방내에서 박동을 주도하는 곳(pacemaker)의 위치를 알 수 있다. 일반적으로 심방이 정위치(situs solitus)인 경우에는 $0\sim+90^\circ$ 이고 좌우심방의 위치가 바뀌었을 경우에는 $+90^\circ\sim180^\circ$ 사이이다.

QRS axis : 심실의 비대나 각분류(bundle branch block)이 있을 경우 정상범위를 벗어난다.

T axis : 일반적으로 $0\sim+90^\circ$ 이고 이 범위를 벗어난 경우 심근의 기능 이상을 의미한다.

④ PR interval : 나이와 심박수에 따라 정상 범위가 다르다. 정상보다 길어졌을 경우 심근염, digitalis 중독, 일부 선천성 심질환(ECD, ASD, Ebstein's anomaly) 그리고 심근 이상등을 의미한다. 정상보다 짧아졌을 경우에는 preexcitation이 있음을 의미한다.

QRS duration : 나이에 따라 정상 범위가 다르다. 정상보다 길어졌을 경우에는 심장내 전도로(conduction system)의 이상이 있거나 심실성 리듬(ventricular rhythm) 또는 약물이나 허혈등으로 인한 심근 기능 이상을 의미한다.

QT interval : 저칼슘혈증, 심근염, 심근 기능 이상, long QT syndrome 등과 여러가지 약물에 의해 길어질 수 있다. 고칼슘혈증과 digitalis 복용시에 짧아진다.

⑤ P wave amplitude and duration : 심방비대가 있을 경우 증가한다.

⑥ QRS amplitude and R/S ratio : 심실비대에 대한 정보를 준다.

abnormal Q wave : 깊은 Q파는 심실비대시에 나타날 수 있다. 깊고 넓은 Q파는 심근 경색시에 나타난다.

⑦ ST segment and T wave : 심근 허혈이나 경색, 심막염(pericarditis), digitalis 복용시에 2mm 이상의 ST segment의 변화가 오고 이때 T파의 변화도 동반된다.

2) Ambulatory electrocardiography (24시간 심전도)

일반 심전도상에서는 발견되지 않았지만 부정맥의 소지가 있을 경우에 이를 진단하기 위하여 이용되는 진단 도구이다. 체표에 접촉성 ECG electrode를 붙이고 카세트 테이프 레코더에 24시간 혹은 그 이상의 시간 동안 심전도를 기록하게 된다. 대개 2개의 channel을 기록한다. 환아에게는 일기장을 주어 증상이 나타나는 시기와 활동을 기록하게 하여 부정맥이 나타나는 시기와 비교한다. 이렇게 하여 기록된 카세트 테이프를 컴퓨터를 이용한 분석작업을 통해 심박수의 변화를 확인하고 부정맥을 진단할 수 있게 된다.

적응증으로는 흉통이나 심계항진, 실신 등이 부정맥과 관련되어 있을 것으로 생각되는 경우와 부정맥의 치료제에 대한 반응을 보고자 하는 경우, 부정맥이 잘 합병되는 수술을 한 경우, 인공 심박동기(pacemaker)의 기능 이상이 의심될 경우, 그리고 중증의 부정맥 시에 수면시의 변화를 보는 경우 등이다.

2. Exercise test (운동부하검사)

운동시 심혈관계에는 심박수, 심박출량, 평균동맥압이 증가하는 변화가 온다. 또한 다리 근육으로의 혈류량을 증가시키기 위해 체혈관 저항(systemic vascular resistance)이 감소한다. 폐동맥에서는 마찬가지로 혈관의 저항이 감소하며 평균폐동맥압은 증가한다.

운동부하검사의 종류는 bicycle ergometer와 treadmill test 두가지가 흔히 이용되고 있다. 이중 bicycle ergometer는 비교적 표준화가 덜 되어있어 널리 사용되지 않으며 대부분의 병원에서는 treadmill test가 표준 검사기술로 이용되고 있다. 이 treadmill test시에는 표준화된 protocol에 따라 운동이 이루어지는데 가장 널리 사용되는 것은 Bruce protocol이다. Bruce protocol은 매 3분 마다 treadmill의 경사와 속도를 증가시켜 운동량을 증가시킨다.

운동부하검사에서 측정하는 요소들은 총운동시간, 심박수, 혈압 등이며 부정맥이나 허혈성 변화를 관찰하기 위하여 심전도를 계속적으로 monitor하게 된다.

운동부하검사의 적응증으로는 흉통, 심실성 부정맥, AV block, 대동맥판막협착, 대동맥 판막폐쇄부전, 대동맥축착 수술후, 청색증성 선천성 심기형 등이 있다.

운동부하검사의 절대금지로는 심각한 부정맥, 심막염, 심근염, 심내막염, 심근경색, 심한 심부전, 폐색전증 등이 있거나 증상이 있는 심한 대동맥 판막협착이 있거나 심장이외에 다른 심한 질병이 있는 경

우 등이다.

운동부하검사를 하는 도중에 검사를 중지시켜야 하는 경우도 발생하는데 혈압이 떨어지거나 심근허혈로 인한 흉통이 발생하거나, 어지러워하거나 실신하였을 경우, 창백하거나 청색증이 나타나거나, 심각한 부정맥이 나타나거나, 환아가 증지를 요청하는 경우에는 검사를 중지하여야 한다.

3. Non-invasive imaging tools

1) Chest X-rays

흉부 방사선 사진으로 다음과 같은 것을 확인하여야 한다.

- location of liver and stomach gas bubble
- skeletal aspect
- identification of aorta
- upper mediastinum
- pulmonary parenchyme
- heart size
- cardiac silhouette
- individual chamber enlargement
- size of great arteries
- pulmonary vascular markings

① location of liver and stomach gas bubble

정상적으로 위(stomach)는 왼편에 그리고 간은 오른편에 있어야 하며 cardiac apex는 위와는 같은 편에, 간과 반대편에 있어야 정위치(situs solitus)이다. Cardiac apex가 위와 반대편에 있거나 midline liver 일 경우에는 heterotaxia를 의심할 수 있으며 이경우 복잡한 심기형일 가능성이 높다.

② skeletal aspect

Pectus excavatum일 경우에는 심장을 눌러 심장의 앞뒤 크기는 작아지고 좌우크기는 커진다. 5세 이상의 경우 대동맥 축착(COA)이 있을 경우 rib notching이 생길 수 있다.

③ identification of aorta

하행대동맥이 척추의 좌측에 보이면 댕개 left aortic arch를 의미하며 우측에 보이면 대개 right aortic arch를 의미한다. 하행대동맥이 보이지 않을 경우 trachea가 어느편으로 밀려 있는지를 확인하면 arch의 위치를 알 수 있다. trachea가 오른편으로 밀려있는 경우는 left aortic arch이고 왼편으로 밀려있는 경우는 right aortic arch이다.

④ upper mediastinum

정상아에서 thymus가 두드러진 경우에는 심장이 커져있는 것처럼 보일 수 있다. 이 경우 lateral view에서 thymus가 superoanterior mediastinum에 있는 것을 확인하면 된다. Mediastinum이 좁아보이는 경우에는 대혈관전위(TGA)를 의심해 볼 수 있고 mediastinum과 심장이 '눈사람'이나 '8자'처럼 보이는 경우에는 supracardiac type의 total anomalous pulmonary venous return을 생각할 수 있다.

⑤ pulmonary parenchyme

심실중격결손 등의 좌-우 단락(shunt)이 많은 경우에 폐렴이 호발한다. 주로 우하엽 부분에 장기간에 걸쳐 계속적으로 보이는 이상이 있을 경우에는 bronchopulmonary sequestration을 의심해 보아야 한다.

⑥ heart size

심장의 크기는 cardiothoracic(CT) ratio로 평가한다. 1세 이상에서 CT ratio가 0.5 이상인 경우는 심장이 커졌다는 것을 의미한다. 흉부 방사선 사진에서 심장이 커졌다는 것은 pressure overload보다는 volume overload를 의미한다.

⑦ cardiac silhouette

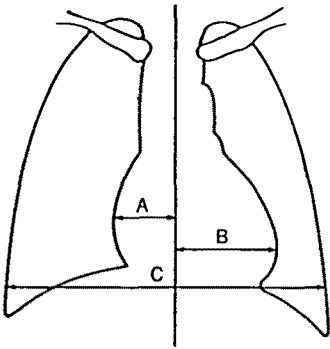
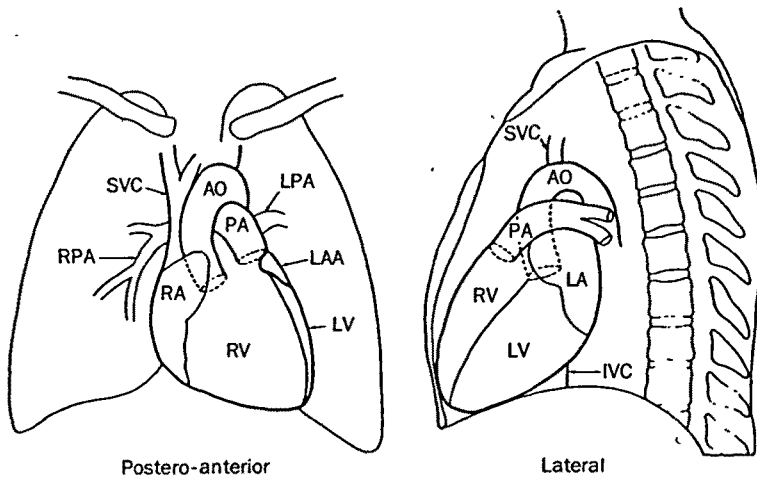
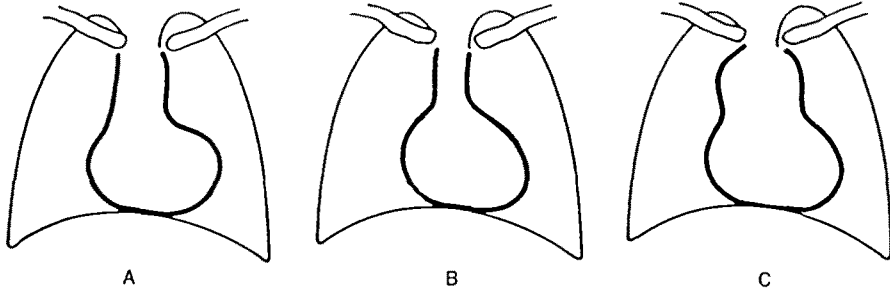


Diagram showing how to measure the cardiothoracic(CT) ratio from the PA view of a chest x-ray film. The CT ratio is obtained by dividing the largest horizontal diameter of the heart A+B by the longest internal diameter of the chest(C).



PA and lateral projections of normal cardiac silhouette. Note that in the lateral projection, the RV is contiguous with the lower third of the sternum and that the LV normally crosses the posterior margin of the IVC above the diaphragm. AO, aorta; LPA, left pulmonary artery; RPA, right pulmonary artery; IVC, inferior vena cava; LA, left atrium; LAA, left atrial appendage; LV, left ventricle; PA, pulmonary artery; RA, right atrium; RV, right ventricle. SVC, superior vena cava.



Abnormal cardiac silhouette. A, "Boot-shaped" heart seen in cyanotic TOF or tricuspid atresia. B, "Egg-shaped" heart seen in TGA. C, "Snowman" sign seen in TAPVR (supracardiac type).

⑧ individual chamber enlargement

좌심방확장 : lateral view에서 좌심방의 뒷경계가 확장되고 PA view에서 "double density"가 보인다. 좌심방확장이 좀더 심해지면 PA view에서 appendage가 두드러지게 보이며 좌측기관지가 위쪽으로 밀리며 barium을 먹인 PA view에서 식도가 우측으로 밀린다.

좌심실확장 : PA view에서 cardiac apex가 좌측 아래로 더 내려가며 lateral view에서 심장의 아래쪽 경계가 뒤쪽 아래로 밀린다.

우심방확장 : PA view에서 심장의 우측 아래쪽 경계가 더 우측으로 밀린다.

우심실확장 : PA view에서는 확실하지 않고 lateral view에서 심장 앞쪽 경계가 더 앞으로 밀려 retrosternal space가 좁아지거나 앎보이게 된다.

⑨ size of great arteries

주폐동맥(main pulmonary artery)이 두드러지게 커져있는 경우에는 폐동맥 판막협착에 의한 폐동맥의 poststenotic dilatation이나 좌-우단락에 의한 증가된 폐혈류 또는 폐동맥 고혈압 등을 의미한다.

주폐동맥이 작아져 있는 경우에는 Fallot 사징이나 폐동맥 폐쇄 등을 의미한다.

상행대동맥이 커져 있는 경우에는 대동맥 판막협착, 대동맥축착, Marfan 증후군 또는 고혈압 등을 의미한다.

⑩ pulmonary vascular markings

폐혈류가 증가되어 있는 경우 청색증이 있는 경우와 없는 경우로 나눌 수 있는데 청색증이 없는 경우에는 심방중격결손, 심실중격결손, 동맥관개존증, 심내막상결손, partial anomalous pulmonary venous return 등을 의미하며 청색증이 있는 경우에는 대혈관전위, total anomalous pulmonary venous return, hypoplastic left heart syndrome, truncus arteriosus, 단심실(single ventricle) 등을 의미한다.

폐혈류가 감소되어 있는 경우는 폐동맥 판막 또는 삼첨판의 폐쇄 또는 협착을 의미한다.

2) Echocardiography

심초음파는 초음파를 이용한 진단 도구로 선천성 심질환의 진단에 있어서 가장 중요한 역할을 하고 있다. 심초음파를 이용하면 심장의

해부학적인 진단과 기능에 대한 정보를 얻을 수 있다. 심초음파는 다음과 같이 분류할 수 있다.

① basic echocardiography

M-mode echocardiography : 심방과 심실 그리고 대혈관의 크기를 알 수 있고 심실중격과 심벽의 두께를 잴 수 있다. 또한 좌심실의 기능을 측정할 수 있으며 심장 판막과 심실중격의 움직임을 관찰할 수 있다. 심낭내에 유액이 고였는 지도 확인할 수 있다.

Two-dimensional echocardiography (이면상 심초음파) : 심장과 대혈관의 단면도(cross-sectional image)를 얻을 수 있다. Transducer를 흉부에 대는 위치에 따라 paraternal, apical, subcostal 그리고 suprasternal view로 나뉘고 각각의 위치에서 다른 각도로 심장을 비추임으로 심장의 여러 단면들을 확인할 수 있다.

Doppler echocardiography : 판막과 대혈관내의 혈류에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이것은 초음파의 Doppler 효과를 이용한 것으로 초음파가 움직이는 물체에 닿으면 그 반사파의 파장이 변화하는 것을 이용한 것이다. 주로 continuous wave와 pulsed wave두가지 기술이 이용되며 판막이나 혈관의 협착의 진단, 심실이나 대혈관의 압력의 추정, 심박출량의 측정 그리고 심장의 이완기능의 이상의 진단 등에 이용된다.

Color flow mapping : 혈류의 방향과 혈류의 장애 등에 대한 정보를 준다. 판막의 폐쇄부전이나 판막과 혈관의 협착 등을 진단할 수 있다.

② special echocardiography

Contrast echocardiography : indocyanine green, dextrose나 saline 등을 정주로 주입하여 작은 bubble등이 생기는 것을 보는 것으로서 심장내의 혈류의 단락 등을 알 수 있다.

Fetal echocardiography : 태아의 심기형이나 부정맥을 진단할 수 있다. 부모가 선천성 심기형을 가지고 있거나 선천성 심기형을 가진 형제가 있을 경우, 산모가 당뇨병이나 전신성 홍반성 낭창 등의 질병을 가지고 있을 경우, 태아에서 염색체 이상이나 심장외의 기형 또는 부정맥 등이 있을 경우와 양수가 너무 많거나 적을 경우 선천성 심기형을 의심해 볼 수 있으며 이러한 경우에 시행할 수 있다.

Transesophageal echocardiography : 내시경의 끝에 초음파 transducer를 달아 식도에 삽입하여 심초음파를 시행하는 것으로서 흉부에서의 심초음파가 좋은 상(image)을 보여주지 못하는 경우에 이용된다. 특히 판막이나 좌심방 내의 thrombus나 심내막염시의 증식 조직(vegetation) 등을 확인할 수 있으며 수술을 받고 있는 중에 시행될 수 있다는 장점이 있다.

Intravascular echocardiography : 작은 도관(catheter) 끝에 transducer를 위치시켜 심초음파를 시행하는 것으로 관상동맥질환이 있는 경우에 이용될 수 있다.

3) Computed tomography (CT)

과거에는 영상을 얻는 시간이 많이 걸려 계속 박동치는 심장에 있어서는 이용되기 어려웠으나 최근 영상을 얻는데 걸리는 시간이 아주

짧은 기계들이 발명되어 심혈관계 질환에도 이용되고 있다. 최근 개발된 두 가지 기계들은 digital spatial reconstructor(DSR)와 ultrafast CT scanner(UFCT)로서 선명한 영상을 제공한다. CT의 장점은 0.7mm 정도의 높은 해상도를 제공하며 적은 양의 조영제로도 enhancement 효과가 크고 심혈관조영술처럼 겹치는 영상이 아니라 심장의 단면도를 제공하고 폐나 뼈와 같은 주위 조직에 의한 영향을 받지 않는다는 점이다.

4) Magnetic resonance imaging (MRI)

신경계 질환에서 많이 이용되고 있는 MRI는 선천성 심기형에서는 그 이용율이 낮은데 그 이유로는 우선 비용-효과 면에서 불리하고 다른 진단 도구들, 즉 심초음파나 심혈관조영술보다 방법이 복잡하다는 것을 들 수 있다. 그러나 공간 해상력이 뛰어나고 3차원적인 구성이 가능하고 심장 조직과 같은 연부 조직의 contrast가 좋기 때문에 점점 이용이 증가되고 있다.

5) Positron emission tomography (PET)

대부분의 심장에 대한 진단 도구들이 해부학적인 구조와 기능에 중점을 두고 있는 반면에 PET는 radio-labeled tracer를 이용하여 심근의 국소 지역의 혈류와 대사(metabolism)에 대한 정보를 준다. 따라서 실제로 구조나 기능의 이상이 오기 전에 생화학적인 수준에서 이상이 있을 경우나 구조적인 이상으로 말미암은 생화학적인 변화를 진단할 수 있다. 현재 심혈관계에서는 관상동맥질환에서 이용되고 있다.

6) Radionuclide methods

방사성 원소들을 주입하여 이들에게서 나오는 감마선(gamma ray)을 포착하여 심장 질환의 진단에 이용하는 것으로서 비교적 적은 양의 방사선에 노출된다는 것이 장점이다. 해상도가 떨어지는 단점이 있으나 검사자 사이에 편차가 적고 되풀이해서 이용될 수 있으며 검사가 간편하다는 장점이 있어 심장질환이 있는 환자에서 정기적으로 검사를 하거나 stress test를 할 경우 이용된다. 현재는 first-pass radionuclide angiography, equilibrium ventriculography 그리고 myocardial scintigraphy 등의 3가지 방식이 이용되고 있다. 이런 검사들은 통하여 심장의 구조, 혈류, 단락, 심근의 기능, 심실의 크기 및 심박출량, 심근의 허혈이나 경색 여부, 심근염의 여부 등에 대한 정보를 얻을 수 있다.

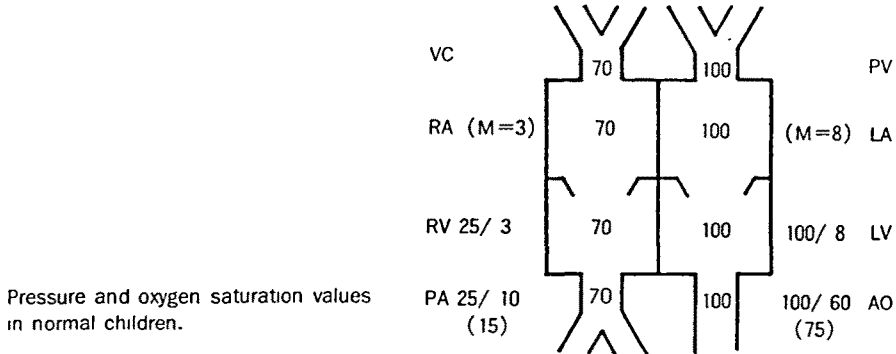
4. Invasive procedures

1) Cardiac catheterization and Angiography

심도자술(cardiac catheterization) 및 심혈관조영술(angiography)은 대부분의 심기형 환자에게 있어서 마지막 결정적인 진단 도구로 이용된다. 대개 진정제를 투여하고 국소 마취후에 검사하지만 신생아, 청색증이 심한 유아, 혈액학적으로 불안정한 경우 등에서는 전신 마취 후에 검사가 이루어지기도 한다.

검사방법은 다음과 같이하여 이루어 진다. 마취후에 피부를 소독하고 고동맥이나 고정맥(femoral artery or vein)으로 도관(catheter)을 삽입한 후에 fluoroscopy하에 심장과 대혈관에 도관을 위치시킨 후 각각의 위치에서 압력을 재고 혈액을 채취하여 oxygen saturation을 측정한다. Oxygen saturation에서 좌-우 단락이나 우-좌 단락이 있는 위치나 그 정도에 대한 정보를 얻을 수 있으며 압력을 측정하면 폐쇄 또는

협착의 위치와 그 정도를 알 수 있다. 여러가지 방법(Fick principle, indicator dilution, thermodilution)을 통하여 심박출량을 산출할 수 있다. 정상아의 경우 심방과 심실, 그리고 대혈관에서의 압력과 oxygen saturation은 아래와 같다.



심도자술을 통해서 체혈관계와 폐혈관계의 혈류량과 저항 그리고 좌-우 단락이나 우-좌 단락의 양을 산출할 수 있다.

$$\text{pulmonary flow (Qp)} = \frac{V_{O_2}}{C_{AO} - C_{MV}} \quad \text{systemic flow (Qs)} = \frac{V_{O_2}}{C_{PV} - C_{PA}}$$

flow (L/min) V_{O_2} : oxygen consumption (ml/min)
 C : oxygen content (ml/L) at various position
 PV : pulmonary vein PA : pulmonary artery
 AO : aorta MV : mixed systemic venous blood

oxygen conten : oxygen capacity (1.36 ml/gHb) × Hb level

left-to-right shunt = $Q_p - Q_s$ right-to-left shunt = $Q_s - Q_p$
 ratio of pulmonary-to-systemic flow = Q_p/Q_s

LA pressure mean PA pressure - mean
 pulmonary vascular resistance = $\frac{\text{LA pressure} - \text{mean PA pressure}}{Q_p}$

RA pressure mean aortic pressure - mean
 systemic vascular resistance = $\frac{\text{RA pressure} - \text{mean aortic pressure}}{Q_s}$

심도자술을 통하여 심장의 혈역학적인 정보들을 얻은 후 대개 심혈관조영술을 시행한다. 심혈관조영술은 조영제를 고속으로 주입하며

서 분당 60 또는 90 frame의 cineangiography를 찍는 것으로 대개 biplane view를 찍어 심장이나 대혈관의 구조에 대한 정보를 얻는다. 심혈관조영술에서는 수용성(water-soluble)이며 1690에서 2150 mOsm/kg 정도의 높은 osmolality를 갖는 이온성(ionic) 조영제나 300 mOsm/kg 정도의 낮은 osmolality를 가지는 비이온성 조영제가 이용된다. 높은 osmolality를 가지는 조영제를 주입한 후에는 세포간질과 세포내로부터 혈관내로 급격한 수액의 이동이 이루어지기 때문에 일시적으로 혈액의 양이 증가하고 적혈구용적(hematocrit)이 약간 감소하며 전해질 농도가 변하게 된다. 조영제의 다른 부작용으로는 viscosity가 증가하고 osmolar diuresis를 일으킬 수 있으며 단백뇨, 혈뇨, 신부전 등을 일으킬 수 있다.

심도자술과 심혈관조영술은 심한 합병증을 일으킬 수 있으며 때로는 사망하는 경우도 있다. 도관의 삽입과 관련된 합병증으로는 심한 부정맥, 심장 블록, 심장 천공, hypoxic spell, 색전, 출혈, 감염 등이 있을 수 있으며 조영제 주입과 관련된 합병증으로는 조영제에 대한 알레르기 반응, 조영제의 심근내로의 주입 그리고 신장과 관련된 합병증 등이 있다. 기타 진정제나 다른 약물의 투여나 벗겨 놓음으로 생길 수 있는 합병증으로는 저체온, 산증, 저혈당증, 경련, 저혈압, 호흡부전 등이 있을 수 있고 이러한 합병증은 특히 신생아에서 잘 생긴다.

2) Catheter intervention procedures

- ① balloon atrial septostomy : TGA, TAPVR, PA, TA
- ② blade atrial septostomy
- ③ balloon valvuloplasty : PS, AS, MS
- ④ balloon angioplasty : recoarctation of aorta, branch PS
- ⑤ closure techniques : PDA, ASD, VSD
- ⑥ embolization of collaterals and other vessels