

Focused Issue of This Month · 관상동맥 질환의 MDCT

CT 관상동맥 조영술의 기술적 측면 : 검사기법과 안전성

Technical Aspect of Coronary CT Angiography : Imaging Tips and Safety Issues

이 활 | 서울의대 진단방사선과 | Whal Lee, MD

Department of Radiology, Seoul National University College of Medicine

E-mail : leew@radiol.snu.ac.kr

J Korean Med Assoc 2007; 50(2): 104 - 108

Abstract

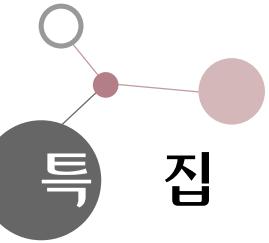
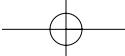
CT coronary angiography is popular nowadays because of the wide use of multidetector CT. Multidetector CT has an isotropic resolution at 0.3~0.4 mm and temporal resolution at 80~210 ms. With the retrospective EKG-gated reconstruction technique and these high spatial and temporal resolutions, coronary artery imaging is possible with CT. EKG-gated CT consists of EKG recording and continuous CT scanning with a low-pitch value. The CT data from certain periods of cardiac cycles, in which the cardiac motion is minimal, are retrospectively selected and reconstructed to whole heart volume data, and then the motion freezing entire heart CT image can be obtained. Because of its limited temporal resolution, EKG-gated CT requires lowering of the heart rate by beta-blocker medication in most cases. The lower heart rate increases diagnostic accuracy of coronary CT angiography. The nitroglycerin can also be used for coronary artery dilatation. Coronary CT angiography is a very reliable method for evaluating coronary artery stenosis with a noninvasive manner. The potential hazard comes from the use of ionized radiation and iodine contrast media. The typical radiation dose for coronary CT angiography is reported as 6.7 ~ 13.0mSv. This radiation dose is equivalent to those for other noninvasive coronary artery evaluating tools with radioactive isotopes and higher than the dose for conventional coronary angiography.

Keywords : Computed Tomography; Coronary artery; Imaging technique; Radiation dose

핵심 용어 : 전산화단층촬영; 관상동맥; 검사기법; 방사선노출

심장은 끊임없이 박동하고 있어, 기존의 단일검출기나 선형 CT(single spiral CT)로는 영상화 할 수 없는 장기였다. 심장의 영상화를 위하여는 빠른 시간해상도 (temporal resolution)가 필요한데 일반적인 CT의 시간해상도는 캔트리가 한 번 회전하는 데 걸리는 시간인 1초 정도 이었기 때문이다. 현재 널리 사용되고 있지 않지만 전자선 CT(Electron beam CT)가 심장 영상검사에 사용되기도 하였다. 전자선 CT는 고정된 텅스텐 타겟에 전자기장에 의하

여 방향이 조절되는 전자선을 직접 쏘아 X선을 발생하는 구조로 되어 있어 캔트리의 회전이 필요하지 않기 때문에 50ms의 시간 동안 4~8절편을 동시에 얻을 수 있다. 이러한 짧은 시간해상도를 이용하여 심장의 동영상이나 심근 관류 영상을 얻을 수 있었고 관상동맥의 영상화에도 사용되었다 (1). 하지만 신호 대 잡음비가 낮아 주로 관상동맥의 석회화 정량(calcium score)에 사용되었고 보편적으로 보급되지 못하였다. 1998년 4개의 절편을 동시에 얻을 수 있는 다중



절편 CT(multislice CT)가 등장하였는데, 이 다중절편 CT는 갠트리 회전속도를 500ms까지 낮추었고 4개의 절편을 동시에 얻을 수 있었다. 또한 180도의 갠트리 회전으로 영상을 재구성하는 방법을 사용하여 시간해상도는 250ms보다 짧아졌다. 이러한 시간해상도와 함께 심전도 동조(EKG gating)기법으로 인해 CT를 관상동맥의 평가에 이용할 수 있게 되었다(2, 3).

이후 다중절편 CT는 계속 발전을 거듭하여 8절편, 16절편을 동시에 얻는 기기가 출현하였고 현재는 64절편을 동시에 획득하는 다중절편 CT가 보편화되었으며 두 개의 X선관과 검출기를 장착하여 시간해상도를 80ms로 발전시킨 기기(4)와 256 절편을 동시에 얻을 수 있어 한 번의 갠트리 회전으로 심장 전체를 촬영할 수 있는 CT 등이 개발되었다(5, 6).

이러한 CT의 발전과 보급은 대부분의 병원에서 CT를 이용한 심장의 영상검사를 가능하게 하고 있어 이에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 심장의 CT 검사를 위한 기술적 배경 및 검사 기법, 그리고 심장 CT 검사의 안전성에 대하여 기술하고자 한다.

심전도 동조 CT 영상

1. 기본 원리

CT 영상은 X선을 이용하여 인체의 단면을 영상화하는 것이다. 박동하는 심장의 정지영상을 얻기 위하여는 심장의 움직임이 적은 시기에 CT 영상을 얻어야 하며 이를 위하여 심전도를 이용하여 심장의 일정 주기에서 영상을 얻는다. 이러한 기법을 심전도 동조 CT라 한다(2). 이는 심전도를 추적하면서 심전도의 일정 부분에서만 영상을 획득하거나, 심전도를 기록하면서 모든 심장주기의 영상을 얻어 놓은 후 심전도를 후향적으로 분석하여 심전도의 일정 부분에서 얻어진 영상자료를 모아 전체 영상을 만드는 방법으로 이루어진다.

2. 심장 주기

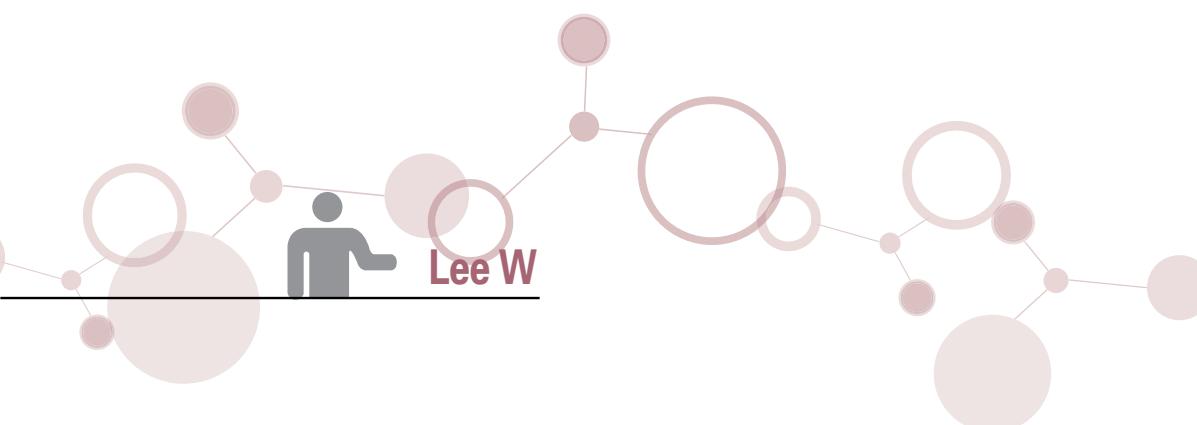
성공적인 심장 CT 영상을 얻기 위하여 심장 주기에 대한 이해가 필수적이다. 심장의 주기는 크게 수축기(systole)와 이완기(diastole)로 나누어진다. 수축기는 다시 등용적성

수축기(isovolumetric contraction period)와 심실 구출기(ejection period)로, 이완기는 등용적성 이완기(isovolumetric relaxation period), 급속 충만기(rapid filling period), 분리기(diastasis or reduced filling period), 심방 수축기(attrial systole)로 나누어진다. 심실의 수축력을 평가하기 위하여는 수축기 말기의 용적과 이완기 말기의 심실 용적을 구하여야 하고, 관상동맥의 영상을 얻기 위하여는 심장의 움직임이 가장 적은 시기에 영상을 얻어야 한다. 따라서 좌심방과 좌심실의 압력이 증가하면서 느리게 혈류가 유입되는 시기인 분리기가 관상동맥을 영상화하기 좋은 시기이다. 심박수가 느린 경우 이완기가 수축기보다 길지만 심박수가 빠를 경우 이완기가 수축기보다 더 짧아질 수 있다. 심장 박동수가 느려지면 이완기의 기간이 증가된다. 심장 박동수가 빨라지면 수축기와 이완기가 모두 단축되는데 그 중에서도 이완기가 더 단축되고, 특히 분리기의 단축이 심하여 아주 빠른 심장 박동에서는 분리기가 완전히 없어지기도 한다. 따라서 관상동맥의 영상을 얻기 위하여는 70회 이하의 느린 심박수에서는 분리기에 영상을 얻어야 하며 70회 이상의 빠른 심박수에서는 수축기 말기에서 등용적성 이완기에 영상을 얻어야 한다(7). 하지만 수축기 말기의 관상동맥이 움직이지 않는 시간은 매우 짧아 진단에 적절한 영상의 질을 항상 얻을 수는 없다.

3. 심장의 동조화: 전향적 동조화와 후향적 동조화

심장의 일정한 주기를 얻기 위하여 심전도를 이용한 동조화를 하여야 하는데 전향적 동조화(prospective EKG triggering)와 후향적 동조화(retrospective EKG gating) 두 가지 방법이 있다(2).

전향적 동조화는 R파가 검출되면 정해진 촬영 시작 지연 시간(scan delay time)을 정하여 scan을 시작하는 방법으로 촬영 테이블을 순차적으로 이동시키며, 나선형 촬영(spiral scan)이 아닌 순차적 촬영(sequential scan)을 한다. 환자의 방사선 피폭량이 적은 장점이 있으나 환자의 R-R 간격이 계속 변화하므로 일정한 심장주기에서 영상을 얻기가 어려워 석회화 정량 검사를 제외하고는 현재까지 관상동맥 CT 조영검사에서는 잘 사용되지 않는다.



후향적 동조화란 심전도를 기록하며 심장을 주기에 상관 없이 연속적으로 촬영한 후 기록되어 있는 심전도를 이용하여 일정 시점의 심장주기에서 영상을 재구성하는 것을 말한다. 이를 위하여 갠트리 1회전당 절편 총 두께와 테이블 이동 비로 표현되는 피치를 작게 하여 중복되는 데이터를 얻어야만 원하는 심장 주기의 완전한 심장 영상을 얻을 수 있다. 사용되는 피치는 0.2에서 0.3 정도가 일반적으로 사용된다. 후향적 동조화는 환자의 피폭량이 많아지고 X선 발생장치의 부하가 많이 걸리는 단점이 있지만 여러 주기의 영상을 얻을 수 있으며, 따라서 관상동맥이 가장 잘 나타난 시기의 영상을 고를 수 있다. 심장 주기의 다양한 시점에서 영상의 재구성이 가능한 점을 이용하면 심장의 동영상을 만들어 낼 수 있고 심실의 기능 평가에 사용될 수 있다. 또한 단면 영상을 만드는 과정에서 절편 간격을 중첩되게 설정할 수 있어 종축 해상도를 증가시킬 수 있으며 부정맥의 영향을 덜 받는 장점이 있다.

4. 심장 주기의 선택

후향적 동조화에서 relative delay, absolute delay, absolute reverse의 3가지 방법으로 심장 주기를 선택한다. Relative delay란 R-R 간격의 일정한 비에서 영상을 재구성하는 방법으로 50% 또는 70% 등으로 표현된다. Absolute delay는 R파가 나타난 뒤 일정시점 뒤에서부터 영상을 재구성하는 방법으로 200ms, 320ms 등으로 표현되고, absolute reverse는 R파가 나타나기 일정시점 전을 기준으로 영상을 재구성하는 방법으로 -400ms, -320ms와 같이 그 앞에 음수부호를 붙여서 표시하게 된다. 심박동수가 촬영시간 동안 일정하다면 이러한 세 가지 방법이 항상 심전도 상의 동일한 부위를 나타내겠지만 실제로 환자의 심박동 수는 촬영시간 동안 계속 변하며, 이러한 R-R 간격의 차이가 이러한 세 가지 방법이 서로 다른 결과를 나타나게 한다. 일반적으로 이완기의 영상을 위하여는 relative delay, absolute reverse가, 수축기 말기의 영상을 위하여는 absolute delay가 더 효과적이다.

실제적으로 심장 주기를 선택하는 데는 한 단면에서 여러 심장주기의 영상을 비교해 보아 움직임에 의한 영상의 왜곡이 가장 적은 시점을 선택하는 방법, -400ms 또는 30%, 60%, 65%, 70% 등 여러 심장주기의 영상을 미리 얻어 놓고 이 모두를 판독하는 방법 등이 있을 수 있으며 기기가 제공

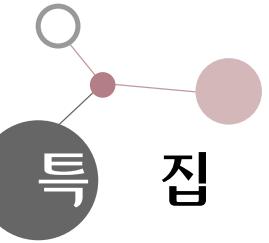
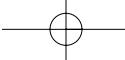
하는 기능과 판독자의 요구에 따라 결정하여야 한다. 어떠한 기기는 relative delay, absolute delay, absolute reverse 중 relative delay만을 제공하기도 하며 표시되는 수치가 기기에 따라 영상을 얻게 되는 영상획득창(acquisition window)의 시작점을 표현하기도 하고 그 중간점을 표현하기도 한다.

5. 시간해상도

시간해상도는 영상획득창의 폭을 의미하며 좋은 시간해상도를 가질수록 빠르게 움직이는 객체를 영상화 할 수 있다. CT 기기의 시간해상도는 갠트리가 180도 회전하는 데 소요되는 시간으로 일반적인 64 다중절편 CT에서 165ms에서 210ms이다. 심박수가 65회 이하라면 이러한 시간해상도로 움직임이 없는 관상동맥의 영상을 얻을 수 있지만 심박수가 빨라지면 상대적으로 심장이 정지상태에 있는 이완기는 더 줄어들게 되고 더 빠른 시간 해상도가 필요하게 된다. 따라서 두 번에서 네 번의 심장주기에서 특정 부위의 영상정보를 얻어내는, 즉 하나의 횡단면 영상을 재구성하는 데 하나 이상의 심장주기에서 얻은 영상정보를 사용하는 다중분절영상재구성(multisegment reconstruction)을 이용하기도 한다. 그런데 이 역시 규칙적인 심장 박동수가 전제되어야 하고 또 심박동수와 갠트리 회전시간의 상호관계에 따라 많은 영향을 받기 때문에 항상 만족할 만한 결과를 주지는 않는다. 따라서 베타 차단제를 사용하여 심박동수를 낮추는 것이 제한된 시간해상도를 가지는 CT를 이용하여 효과적으로 관상동맥을 검사할 수 있는 방법이다.

6. 공간해상도(Spatial Resolution)

관상동맥은 매우 구불구불한 주행을 하고 있고, 그 크기는 5mm에서 1mm 정도로 작은 혈관이다. 이러한 작은 구조물을 영상화하고 그 내부의 협착 정도를 판단하기 위하여는 1mm 이하의 해상도가 필요하다. 또한 CT 단면 영상과 평행한 주행경로를 가지는 혈관의 이상 유무를 판정하기 위하여는 종축의 해상도 또한 같은 정도로 요구된다. 관상동맥을 촬영하기 위한 관심영역(Field of View, FOV)에서 CT 단면 영상의 픽셀(pixel)의 크기는 약 0.3mm × 0.3mm 정도이며, 현재의 64열 다중절편 CT는 절편의 두께가 0.4~0.6mm로 관상동맥을 영상화 하기에 적절한 공간해상도를 제공하고 있다.



7. 촬영범위 및 촬영시간

CT 검사에서는 호흡 운동에 의한 영향을 배제하기 위하여 단일 호흡정지 기간 중 영상을 얻는 것이 중요하다. 대개 우폐동맥이나 기관분지부에서부터 심첨부까지를 촬영범위로 선택하며 최신의 64열 다중절편 CT의 경우 이러한 범위를 촬영하는 데 5초에서 12초 정도가 소요되므로 단일 호흡정지로 영상화가 가능하다.

8. 조영제의 사용

관상동맥의 협착 유무를 판정하기 위하여 높은 대조도가 필요하며 조영제의 사용은 필수적이다. 조영제는 대개 60~120ml의 양을 초당 3.5~5ml의 속도로 주입하게 된다. 조영제의 주입 후 촬영 시작 지연시간을 결정하는 것이 중요한데 관상동맥이 가장 높은 조영을 보일 때 촬영이 이루어져야 하기 때문이다. 개인마다 적절한 촬영시작 지연시간이 다르기 때문에 이를 위하여 덩어리예비촬영기법(test bolus technique)과 덩어리추적방법(bolus tracking)이 사용된다. 덩어리예비촬영기법이란 25ml 정도 소량의 조영제를 주입하여 예비촬영을 해보고 가장 조영증강이 잘 되는 시점을 파악하여 본 촬영을 시행하는 것으로, 이론적으로 이상적이지만 촬영시간이 길어지고 촬영 과정이 번거로운 단점이 있다. 덩어리추적방법은 대동맥 등에 관심영역을 설정한 후, 이 영역의 CT 값이 100과 같은 일정 수치를 넘으면 촬영을 시작하는 방법으로 보다 간단하게 수행될 수 있어 많이 이용되고 있다.

9. 전처치

CT 관상동맥 조영술의 진단적 정확도와 심박수와의 관계는 잘 알려져 있다(8~10). 느린 심박수는 관상동맥의 움직임이 최소가 되는 심장 주기의 분리기를 길게 하여 제한된 시간해상도로 관상동맥을 촬영하기에 적절한 조건을 만들어 준다. 따라서 심박수가 느릴수록 관상동맥 조영술의 진단적 정확도는 올라간다. 심박수의 조절을 위하여 베타 차단제를 사용하며, 이러한 베타 차단제는 심박수를 떨어뜨릴 뿐 아니라 검사 도중 심박수의 변화를 줄여주는 역할도 한다. 베타 차단제의 금기증인 저혈압, 심부전, 방서맥, 방실차단의 유무를 확인하여야 한다. 관상동맥의 확장을 위하여 Nitroglycerin을 사용할 수 있다. 관상동맥이 확장되면 제한

된 CT 공간해상도로 관상동맥의 협착 유무를 더 자세히 영상화 할 수 있지만 Nitroglycerin의 사용이 CT 관상동맥 조영술의 진단적 정확도에 미치는 영향은 아직 알려져 있지 않다.

10. 관상동맥 CT 조영술의 안전성

CT를 이용하여 관상동맥을 촬영하는 경우 상완정맥의 정맥로 확보가 유일한 침습적인 시술로, 시술 자체에서 유래하는 부작용은 거의 없다고 할 수 있다. 하지만 iodine 조영제와 X-ray라는 전리 방사선의 사용 측면에서 CT의 일반적인 위험도를 가지고 있으며 또한 검사시 심박수의 조절과 관상동맥 확장을 위하여 베타차단제나 nitroglycerin 등의 약제를 사용하기도 하므로 이러한 약제의 부작용을 염두에 두어야 한다.

11. 방사선 피폭

CT 관상동맥 조영술은 6.7~13.0mSv의 방사선 조사량을 가진다. 이는 고식적인 관상동맥 조영술의 2.1~2.5mSv 보다 상대적으로 높다. 하지만 CT 관상동맥 조영술의 방사선 피폭량은 복부 다중 시기 CT나 대동맥의 CT 혈관조영술 등의 다른 CT 검사나, SPECT나 PET와 같은 방사선 동위원소를 이용한 비침습적 심장 영상검사의 방사선 피폭량과 유사하다. 20mSv 이하의 방사선 피폭량이 인체에 유해하다는 증거는 아직 없지만 방사선 노출을 수반하는 검사는 반드시 필요한 경우로 국한되어야 한다. 이러한 방사선 노출을 줄이기 위하여 X선의 양을 대상의 감쇄 정도에 따라 조절하거나 심전도의 수축기에 조사되는 X선의 양을 줄여 방사선 피폭량을 줄이려는 노력을 하고 있고 어느 정도 가시적인 성과를 보이고 있다(11~13). 최근에는 120kVp 대신 100kVp를 사용하는 저선량 관상동맥 CT 기법을 이용하여 5mSv까지 방사선 피폭량을 줄이는 시도가 보고되고 있으나 진단적 정확도에 어떠한 영향을 미치는지는 아직 밝혀지지 않았다(13).

결 론

CT 관상동맥 조영술은 비침습적으로, 관상동맥을 효과적이고 안전하게 평가할 수 있는 방법이다. 적절한 검사를 시행하기 위하여는 심전도 동조 관상동맥 촬영의 기본원리 및 영상을 얻을 심장주기의 선택 등 영상의 질에 영향을 미칠 수 있는 인자에 대하여 숙지하고 있는 것이 필요하다.

Lee W

참고문헌

1. Lu B, Zhuang N, Mao SS, Baksheshi H, Liu SC, Budoff MJ. Image quality of three-dimensional electron beam coronary angiography. *J Comput Assist Tomogr* 2002;26:202-209.
2. Ohnesorge B, Flohr T, Becker C, Kopp AF, Schoepf UJ, Baum U, Knez A, Klingenberg-Regn K, Reiser MF. Cardiac imaging by means of electrocardiographically gated multislice spiral CT: initial experience. *Radiology* 2000;217:564-571.
3. Nieman K, Cademartiri F, Lemos PA, Raaijmakers R, Pannen PM, de Feyter PJ. Reliable noninvasive coronary angiography with fast submillimeter multislice spiral computed tomography. *Circulation* 2002;106:2051-2054.
4. Scheffel H, Alkadhi H, Plass A, Vachenauer R, Desbiolles L, Gaemperli O, Schepis T, Frauenfelder T, Schertler T, Husmann L, Grunenfelder J, Genoni M, Kaufmann PA, Marincek B, Leschka S. Accuracy of dual-source CT coronary angiography: First experience in a high pre-test probability population without heart rate control. *Eur Radiol* 2006;16:2739-2747.
5. Kondo C, Mori S, Endo M, Kusakabe K, Suzuki N, Hattori A, Kusakabe M. Real-time volumetric imaging of human heart without electrocardiographic gating by 256-detector row computed tomography: initial experience. *J Comput Assist Tomogr* 2005;29:694-698.
6. Mori S, Kondo C, Suzuki N, Yamashita H, Hattori A, Kusakabe M, Endo M. Volumetric cine imaging for cardiovascular circulation using prototype 256-detector row computed tomography scanner (4-dimensional computed tomography): a preliminary study with a porcine model. *J Comput Assist Tomogr* 2005;29:26-30.
7. Achenbach S, Ropers D, Holle J, Muschiol G, Daniel WG, Moshage W. In-plane coronary arterial motion velocity: measurement with electron-beam CT. *Radiology* 2000;216:457-463.
8. Kuettner A, Kopp AF, Schroeder S, Rieger T, Brunn J, Meissner C, Heuschmid M, Trabold T, Burgstahler C, Martensen J, Schoebel W, Selbmann HK, Claussen CD. Diagnostic accuracy of multidetector computed tomography coronary angiography in patients with angiographically proven coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol* 2004;43:831-839.
9. Kuettner A, Beck T, Drosch T, Kettering K, Heuschmid M, Burgstahler C, Claussen CD, Kopp AF, Schroeder S. Diagnostic accuracy of noninvasive coronary imaging using 16-detector slice spiral computed tomography with 188 ms temporal resolution. *J Am Coll Cardiol* 2005;45:123-127.
10. Hoffmann U, Moselewski F, Cury RC, Ferencik M, Jang IK, Diaz LJ, Abbara S, Brady TJ, Achenbach S. Predictive value of 16-slice multidetector spiral computed tomography to detect significant obstructive coronary artery disease in patients at high risk for coronary artery disease: patient-versus segment-based analysis. *Circulation* 2004;110:2638-2643.
11. Hunold P, Vogt FM, Schmermund A, Debatin JF, Kerkhoff G, Budde T, Erbel R, Ewen K, Barkhausen J. Radiation exposure during cardiac CT: effective doses at multi-detector row CT and electron-beam CT. *Radiology* 2003;226:145-152.
12. Donnelly PM, Higginson JD, Hanley PD. Multidetector CT coronary angiography: have we found the holy grail of non-invasive coronary imaging? *Heart* 2005;91:1385-1388.
13. Abada HT, Larchez C, Daoud B, Sigal-Cinqualbre A, Paul JF. Multislice CT of the coronary arteries: feasibility of low-dose CT with ECG-pulsed tube current modulation to reduce radiation dose. *Am J Roentgenol* 2006;186:S387-390.



Peer Reviewer Commentary

도경현 (울산의대 영상의학과)

본 논문은 관상동맥질환의 진단을 위한 다중절편 전산화단층촬영기기의 검사기법과 기술적 측면을 살펴보고 있다. 노령 인구의 증가와 생활환경의 변화로 인하여 관상동맥질환이 증가하고 있으나, 기존의 침습적인 방법으로는 선별검사로 사용이 어려웠다. 다중절편 전산화단층촬영기를 이용하면 비침습적인 방법으로 빠른 시간에 진단이 가능하여 조기치료가 가능할 것으로 생각되어 최근 그 이용이 현저히 증가하고 있는 상태이다. 그러나 기기의 원리 이해와 정확한 검사법의 적용이 없이는 정확한 정보를 얻을 수 없다. 본 논문은 이를 위하여 심전도 동조 관상동맥 촬영의 기본원리 및 영상을 얻을 심장주기의 선택 등 촬영방법, 적절한 조영 증강방법 등을 기술하고 있다. 본 논문에서 소개한 바와 같이 CT 관상동맥 조영술은 비침습적으로 관상동맥을 효과적이고 안전하게 평가할 수 있는 방법이며 적절한 검사를 시행하기 위하여는 영상의 질에 영향을 미칠 수 있는 인자에 대하여 숙지하고 있는 것이 필요하다. 그러나 아직도 부정맥이 있거나 심장주기가 불규칙한 환자에서는 진단적 가치가 있는 영상을 얻기 어려운 경우가 많으며, 방사선 피폭이나 조영제 사용에 따른 부작용을 고려하여야 하는 문제가 있으므로 이에 대한 고찰과 연구가 필요할 것으로 생각된다.