



심장의 전산화단층촬영

Cardiac CT

최 병 옥 | 연세의료대 영상의학과 | Byoung Wook Choi, MD

Department of Radiology and Imaging Science, Yonsei University College of Medicine

E-mail : bchoi@yumc.yonsei.ac.kr

J Korean Med Assoc 2007; 50(1): 5 - 17

| Abstract |

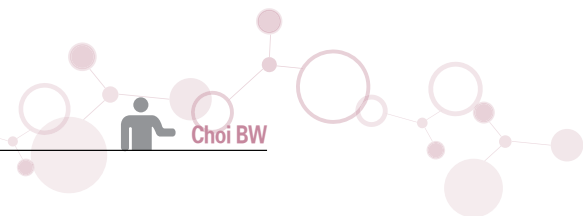
Multislice computed tomography (CT) is emerging technology that enables imaging the moving heart with high resolution. The current technology of CT is represented by 64-slice CT. CT is becoming the first-line evaluation tool for the detection of significant coronary artery stenosis and is applied for the detection of plaque composition and functional imaging. Significant coronary artery stenosis can be detected with a high accuracy over 90% and can be reliably excluded with a high negative predictive value approaching 100% by using 64-slice CT. CT coronary angiography is recommended not only to exclude significant stenosis in patients with equivocal symptoms or intermediate results on stress test but also to assess obstructive disease in symptomatic patients. Quantification of coronary artery calcium with CT is helpful to select patients for lipid-lowering therapies, who have intermediate coronary artery disease risk. With technical improvement, spatial and temporal resolution of CT will reach the level enough to establish the diagnoses of in-stent restenosis, plaque composition, and ventricular and valvular function in the foreseeable future. Myocardial imaging including myocardial perfusion and viability may be possible without increasing radiation exposure. CT is a very promising technology for cardiac imaging because, with technical improvement, clinical benefits are expected to be greater than the risk of radiation exposure. This short review is for readers ① to understand CT technology for cardiac imaging, ② to understand the limitation of current technology of CT for cardiac imaging, ③ to learn the current application of CT in cardiac diseases, ④ to get a perspective on the future directions of cardiac CT.

Keywords : Computed tomography; Cardiac imaging; Coronary artery disease

핵심용어 : 전산화단층촬영; 심장 영상; 관상동맥질환

심장 질환은 서양 뿐 아니라 동양권에서도 중요한 사망의 하나이다. Computed Tomography(CT)를

이용하여 심장 질환을 비침습적으로 진단하려는 시도는 1970년대부터 시작되었다. 1990년대 심장 전용 진단기



기로 개발된 전자선 CT(Electron beam CT)는 관상동맥 질환 연구에 공헌하였으나 현재는 그 이후에 개발된 다검출기 CT(=Multidetector CT, 다절편 CT=Multislice CT)가 심장 CT를 대변하고 있다. 심장 CT 기술은 향상된 시간 및 공간 해상도를 특징으로 한다. 그러나 현재의 CT 기술은 빠른 심장의 움직임을 보상하며 영상을 얻기에 충분한 시간 해상도나, 1mm 이하의 작은 혈관이나 경화판을 영상화 하기에 적절한 공간 해상도를 가지고 있지 않다. 그럼에도 불구하고 CT는 현재 및 미래의 기술로 각광받고 있는데 그 이유는 비침습적이고, CT 기술 개발의 속도가 매우 빨라 미래의 가능성에 대한 기대가 크기 때문이다. CT는 다른 비침습적 진단 검사와 경쟁하거나 협조하면서 관상동맥 협착의 진단을 위한 일차선택 검사로서의 입지를 굳히고 있다. CT를 이용하여 관상동맥 경화판의 성분을 영상화함으로써 급성 관상동맥 증후군을 유발할 위험도가 큰 경화판을 진단하는 것이 미래에 큰 화두가 될 전망이다. 최근에는 CT를 이용하여 심실의 기능, 판막의 기능, 심근의 관류와 생존능을 진단하려는 시도가 잇따르고 있다.

심장 CT의 이해

심장 영상의 특징은 심장이 움직인다는 점과 관상동맥이 작은 구조라는 점이다. 따라서 진단적인 심장 영상을 얻기 위하여 높은 시간 해상도(temporal resolution)와 공간 해상도(spatial resolution)가 요구된다.

CT는 원통 모양의 갱트리(gantry) 한 편에 X선을 발생하는 장치를, 맞은 편에 X선을 검출하는 검출기를 장치하여 인체 주위를 돌면서 연속적으로 인체의 단면 영상을 얻는 비침습적 영상장치이다. 다검출기 CT는 검출기의 수에 따라 명명되는데, 검출기가 32개 또는 64개이며 동시에 64개 절편의 영상 데이터를 획득하는 64-절편 CT가 최근 가장 많이 사용되는 심장 CT이다. 다검출기



Figure 1. The mid to distal left anterior descending artery is almost occluded by an eccentric noncalcified plaque (arrows), which measures 20 HU suggesting lipid-rich composition

CT는 한번에 넓은 부위를 촬영하여 숨을 한 번 참는 동안 심장을 모두 촬영할 수 있게 하였다. 얇은 검출기를 사용하여 공간 해상도를 높여 작은 구조인 관상동맥의 병변을 촬영할 수 있게 하였고, 갱트리의 회전 속도를 빠르게 하여 심장을 촬영하고 이를 심전도 동조시켜 재구성하여 움직임에 의한 흐려짐이 없는 깨끗한 정지 영상을 얻을 수 있게 하였다(Figure 1).

64-절편 CT는 5초 이내에 심장을 촬영할 수 있고, 0.4mm의 해상도를 가지며, 항상 유지할 수 있는 시간 해상도는 165ms(50~200ms)이다. 그러나 분당 62회 뛰는 심장에서 관상동맥 영상을 얻기 위해서 100ms 이하의 시간 해상도가 필요하다. 다검출기 방식에 더하여 X선 발생기를 2개 장착한 이중 X선 CT(Dual-source CT)는 시간 해상도를 82.5ms로 대폭 향상시켰다. 그러나 심장이 빠르게 움직이는 수축기에 영상을 얻고자 하면 50ms 이하의 시간 해상도가 필요하다(1).

침습적 X선 혈관조영술의 공간 해상도 0.15mm와 시간 해상도 10~20ms에 비교하여 CT영상이 부족함을 알

Table 1. Accuracy of 64-slice CT for detection of significant coronary artery stenosis ($\geq 50\%$ in diameter)

First author	Patient number	Exclusion (%)	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Analyzed segments
Ehara (36)	69	8	90	94	All
Fine (37)	66	6	95	96	>1.5mm
Leber (38)	59	—	73~88	97	All
Leschka (39)	67	—	94	97	>1.5mm
Mollet (40)	52	2	99	95	All
Pugliese (41)	35	—	99	96	All
Raff (6)	70	12	86	95	All
Ropers (42)	82	4	95	93	>1.5mm

수 있다.

64-절편 CT 기술로 진단적 심장 영상을 얻기 위하여 베타차단제를 투여하고 심장 박동수를 분당 60~65회 이하로 조절하여 촬영하는 것이 권장되고 있다.

1. 관상동맥 협착 (Coronary Artery Stenosis)

관상동맥의 내강 협착을 진단하는 기준이 되는 검사는 침습적 X선 관상동맥조영술이다. 이 검사에 따르는 무증상 뇌중풍의 발생률이 20%에 육박한다는 보고가 있다(2). 그러므로 심각한 내강 협착을 여러가지 비침습적인 방법으로 진단하고자 노력해왔다. 하지만 아직도 관상동맥조영술을 시행받는 환자의 25~40%는 심각한 협착이 없는 환자로 밝혀진다(3). CT를 이용한 관상동맥 협착의 진단 정확도는 CT의 기술 발전과 더불어 점차 개선되고 있어 CT를 이용하여 심각한 협착이 없는 환자에서 침습적 관상동맥조영술을 시행하는 빈도를 줄일 수 있을 것이다.

2. CT의 정확도

메타분석에 의하면 50% 이상의 심각한 관상동맥 협착을 가진 환자에 대한 CT의 민감도와 특이도는 16-절편 CT에서 95%, 84%이고 64-절편 CT에서 100%, 100%

이다. 평가 가능한 분절은 16-절편 CT에서 79%이고 64-절편 CT에서 96%이다. 심각한 관상동맥 협착을 가진 분절에 대한 민감도는 16-, 64-절편 CT에서 각각 88%, 92%, 특이도는 96%, 95%이다(4, 5). 64-절편 CT의 정확도가 90%를 넘게 되었지만 평가가 불가능하거나 진단이 정확하지 않은 경우가 종종 발생한다(Table 1). 원인들은 관상동맥 칼슘이 많아서 (Agatston score >400) 내강 협착 진단이 어렵거나, 비만이 심하여 영상의 잡음이 심하거나, 심장박동이 분당 70회를 넘어 운동 인공물(motion artifact)이 많은 경우이다(6).

3. CT의 적응증

관상동맥 협착의 진단만을 목적으로 하며 중재적 시술이 필요하지 않을 것으로 예상된다면 CT를 사용할 수 있다. 최근 미국심장협회(American Heart Association)는 관상동맥질환의 증상이나 스트레스 검사 결과가 애매하면 관상동맥 협착을 배제하기 위해서 CT를 침습적 관상동맥조영술 대신 사용할 수 있다고 하였다. 특히 위험도가 낮거나 중등도인 경우 침습적 관상동맥조영술의 진단적 사용을 줄일 수 있을 것이다. 이는 CT가 100%에 가까운 매우 높은 음성예측치로 심각한 관상동맥 협착을

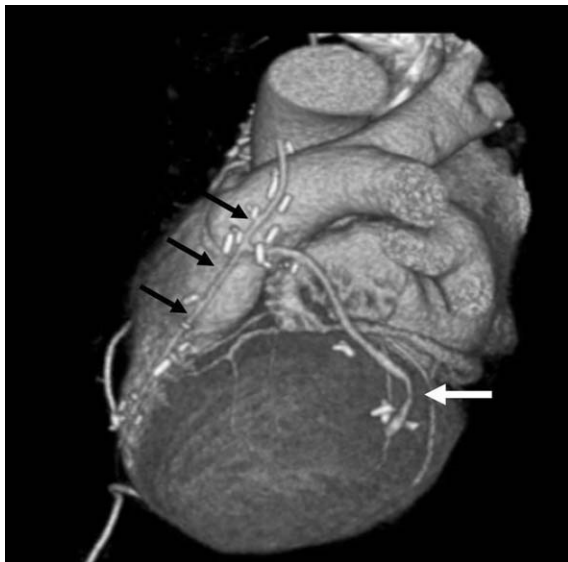
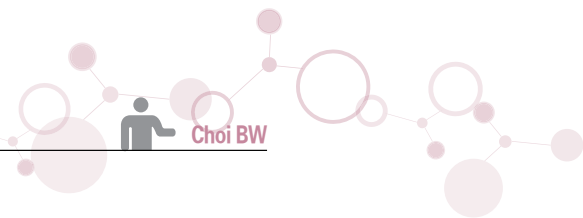


Figure 2. The left internal thoracic artery graft (black arrows) is connected to the distal left anterior descending artery. A Y-shape connection using a radial graft from the left internal thoracic artery graft to the first obtuse marginal branch shows a focal stenosis (white arrow)

배제할 수 있기 때문이다(7). 관상동맥질환의 위험도가 높은 무증상 환자의 선별 검사로서는 아직 권장되지 않고 있다. CT로 관상동맥 기형을 매우 정확하고 쉽게 진단할 수 있다. 이 외에 심장 수술 전 관상동맥의 구조 파악이 필요할 때, 침습적 관상동맥 조영술이 어렵거나 출혈 등의 위험이 예상될 때 CT를 이용할 수 있다.

4. 급성 흉통 (Acute Chest Pain)

응급실에 내원한 급성 흉통 환자에서 급성 관상동맥 증후군(acute coronary syndrome)을 감별하기 쉽지 않으며 급성 관상동맥 증후군의 선별 기준이 매우 낮다. 따라서 급성 관상동맥 증후군으로 의심되어 입원한 환자의 60% 이상이 급성 관상동맥 증후군이 아니다(8). 반대로 급성 관상동맥 증후군의 진단을 못 내리는 경우도 2~8%에 이른다. 급성 흉통 환자에서 CT를 이용하여 급성 관상

동맥 증후군을 배제할 수 있다. 최근의 한 연구는 급성 흉통 환자에서 CT를 사용하여 심각한 관상동맥 협착이나 관상동맥 경화판을 발견할 수 없으면, 100%의 음성예측치로 급성 관상동맥 증후군을 배제할 수 있다고 하였다(9). 급성 흉통 환자에서 CT는 급성 관상동맥 증후군 이외의 원인, 즉 폐동맥 혈전색전증이나 대동맥 박리 등의 진단과 배제에도 유용하다(10).

5. 만성 폐색 (Chronic Total Obstruction)

관상동맥의 만성 완전 폐색이 있는 환자에서 이를 재개통하는 시술을 하는 것이 예후에 좋다고 알려져 있다. 폐색 길이가 15mm가 넘거나 심한 칼슘이 있을 때 재개통의 실패율이 높아지며 시술 전에 CT로 이를 평가할 수 있다(Figure 2)(11).

6. 관상동맥 우회술 (Coronary Artery Bypass Surgery)

관상동맥 우회술 후의 평가에서 이식혈관의 폐색은 100%에 근접하는 정확도로 진단이 가능하다. 64-절편 CT를 이용하여 폐색 뿐 아니라 협착이나 원위 연결 부위도 정확히 진단할 수 있다(Figure 3)(12). 그러나 여전히 많은 클립으로 인한 금속 인공물은 진단에 장애가 된다. 우회술 후 이식 혈관 및 관상동맥을 동시에 평가할 수 있는데 대개 우회술을 받은 환자의 관상동맥은 심한 칼슘을 동반한 경우가 많아 진단이 어렵다(13).

7. 판막 수술 전 관상동맥 협착의 평가

모든 종류의 판막 질환에서 동반된 관상동맥 협착은 수술에 관련된 예후를 나쁘게 하므로 수술 전 침습적 관상동맥조영술을 시행하는 것이 권장되며 이를 CT로 대체할 수 있다(14).

8. 급기증 및 고려사항

심방세동 등의 부정맥, 심각한 비만 환자, 작은 가지 혈

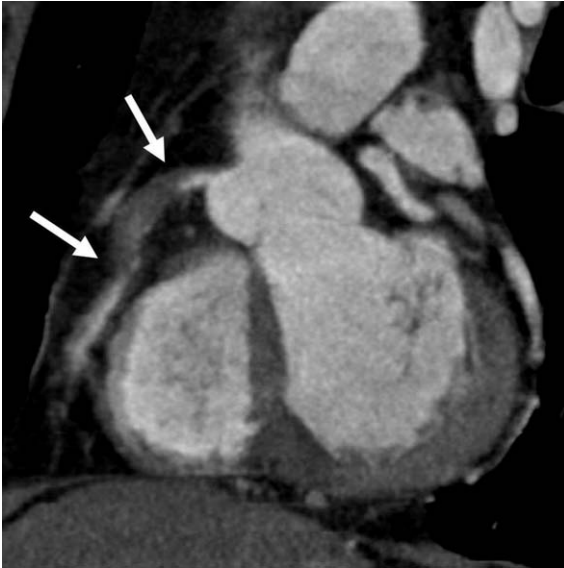


Figure 3. The proximal right coronary artery is totally occluded. CT coronary angiography excellently reveals the extent of occlusion (arrows), distal contrast-filling by collateral flow, plaque density, and vascular remodeling

관의 병변, 석회화가 동반된 병변, 스텐트 내의 병변 등에서 CT 진단이 어려울 수 있다. 신부전 환자에서는 요오드 조영제의 사용이 어렵고, 여러번 추적검사가 필요한 경우 방사선 노출에 대한 고려가 필요하다. 관상동맥 질환의 위험인자가 낮거나 높은 경우에는 협착 영상보다는 경화판 영상이나 SPECT 등의 기능적 영상을 고려하는 것이 좋다.

관상동맥 스텐트

관상동맥 협착 치료에서 약물방출 스텐트(drug-eluting stent)의 기술이 점점 높아가고 재협착률(in-stent restenosis)은 매우 낮아졌지만, 일반 스텐트의 6개월 재협착률은 아직 11~46% 정도에 이르고 약물방출 스텐트의 재협착률은 5~10% 정도이다(15). 스텐트의 재

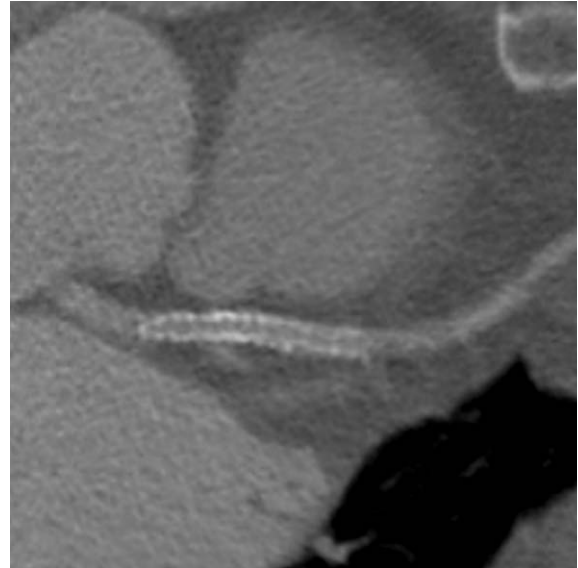


Figure 4. A stent in the proximal left anterior descending artery shows patent lumen without evidence of restenosis by using 64-slice CT

협착을 CT로 추적 검사하여 조기 발견할 수 있으나 스텐트의 금속 재질에 의한 인공물이 진단을 어렵게 한다. 인공물의 심각도는 스텐트의 종류와 규격(내경, 두께, 및 구조) 그리고 CT의 성능에 따라 달라진다. 16-, 64-절편 CT로 스텐트의 내경이 3.5mm 크기 이상이 되어야 스텐트 내의 내강 협착을 진단할 수 있다. 스텐트뼈대(strut)의 두께가 0.14mm인 Cypher나 BxSonic 스텐트에 비하여 0.13mm인 Taxus 스텐트에서 평가가 쉽다. 64-절편 CT를 사용한 연구에 의하면 평가가 가능한 스텐트는 58%에 불과했고 이 중 50% 이상의 재협착이 일어난 스텐트에 대한 민감도가 50%, 특이도는 57%였다. 그래도 평가 불가능한 경우를 제외하면 민감도가 86%, 특이도가 98%로서 평가 가능한 스텐트인 경우에는 CT가 유용하게 쓰일 수 있음을 시사한다(Figure 4)(16). 특히 좌주 관상동맥 (left main coronary artery)의 스텐트의 재협

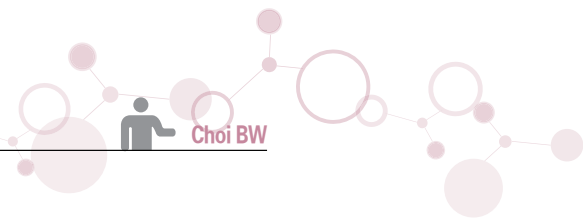


Table 2. Measurement of CT density according to the composition of plaque

First Author	Detectors	Subjects	Standard of reference	Lipid-rich plaque (HU)	Fibrous plaque (HU)	Calcified plaque(HU)
Leber (43)	16	46	IVUS	49±2	91±22	391±156
Viles-Gonzalez (44)	16	6	Histopathology	51±2	116±27	—
Schroeder (45)	4	12	Histopathology	42±2	70±2	715±328
Becker (46)	4	11	Histopathology	47±9	104±28	
Schroeder (47)	4	15	IVUS	14±26	91±21	419±194

작에 대한 64-절편 CT의 진단 정확도는 93%(민감도, 특이도, 양성예측치, 음성예측치는 각 100%, 91%, 67%, 100%)로서 좌주동맥 스텐트의 재협착 검사에 일차선택 검사로서 사용될 수 있을 것이다(17).

관상동맥 경화판

1. 석회화 경화판 (Calcified Plaque)

관상동맥 칼슘 수치는 관상동맥 경화판의 총량과 상관관계가 높고, 다른 위험인자들보다 관상동맥질환의 예후 예측도가 높다. Agatston 등이 전자선 CT를 이용하여 정립한 관상동맥 칼슘 수치 측정법은 칼슘 정량화의 표준으로 사용되어 왔다(18). 최근 다인종 죽상경화증 연구(multi-ethnic study of atherosclerosis, MESA)에서 밝혀진 바에 의하면 다검출기 CT를 이용한 경화판의 부피 측정이 기존의 Agatston 수치에 비하여 조금 더 정확한 재현성을 가진다(19). 관상동맥 칼슘 수치는 젊은 무증상 환자에서 미래 심장 사고의 위험도를 과대평가한다. 반대로 관상동맥 석회화가 없는 군의 15%에서 비석회화 경화판이 발견되며, 이러한 석회화가 없는 고위험도 경화판에서 발생하는 급성 심근 경색을 선별할 수 없다. 최근의 연구에서는 무증상 환자에서도 칼슘 수치가 높을수록 심근 허혈의 빈도가 증가하고 혈관 확장 예비능이 떨어져 있다고 보고되어 불현성 심근 허혈의 선별

검사 기능도 할 수 있을 것으로 생각된다(20). 2006년 미국심장협회의 권고 사항에 따르면 Framingham 10년 위험도가 10~20% 사이인 중등도 관상동맥질환 위험 환자에서 임상적 위험도를 더 정확히 예측하고 적극적인 지질저하제 치료의 대상을 선택하기 위해 관상동맥 칼슘을 측정하는 것이 적절하다고 하였다(7). 그러나 경화판 석회화의 비균질성 때문에 지방저하제나 항염제를 사용하고 죽상경화증의 퇴행을 평가할 때에는 전체 칼슘 수치보다 개별 경화판의 변화를 평가하는 것이 좋을 것이다(21).

2. 비석회화 경화판 (Noncalcified Plaque)

파열되기 쉬운 관상동맥의 경화판을 취약경화판(vulnerable plaque) 또는 고위험 경화판(high-risk plaque)이라고 하며, 이런 경화판은 두께가 약 65~150 micrometers 정도 되는 얇은 섬유성 모자(fibrous cap)와 지방으로 이루어진 핵심부(lipid core)를 가진다. 이러한 경화판은 관상동맥의 경미한 협착과 동반되는 경우가 많아 침습적 관상동맥 조영술에 의하여 발견되지 않는 경우가 많다. 지금까지 혈관내 초음파나 조직학적으로 확인된 여러 성분의 경화판과 다검출기 CT를 이용한 밀도 측정을 비교한 연구에서, 지방성 경화판(lipid-rich plaque)과 섬유성 경화판(fibrous plaque)이 서로 다른 밀도로 측정된다고 보고되고 있어 CT를 이용하여 취약

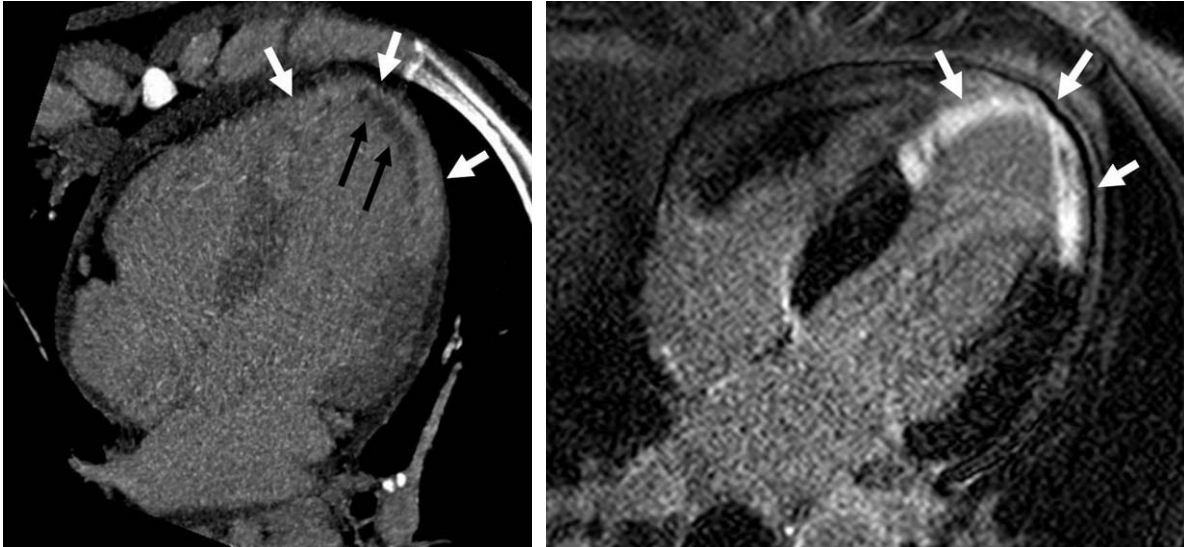


Figure 5. The 10-minute delayed CT scan after contrast administration (left panel) shows high enhancement of the septum, apex and lateral wall (white arrows). A dark poorly enhanced band-like region is noted sub-endocardially at the apex, which is considered as microvascular occlusion. The magnetic resonance image (right panel) obtained by delayed enhancement protocol shows transmural hyperenhancement at the same area as CT shows

경화판을 발견할 수 있을 것으로 기대되고 있다(Table 2, Figure 1). 최근의 연구에서 16-절편 CT의 취약경화판 진단의 민감도, 특이도, 양성예측치, 음성예측치는 86%, 69%, 90%, 61%였다(22). 64-절편 CT를 이용한 연구에서 비석회화 경화판, 석회화 경화판 중 칼슘이 50% 이하로 섞여있는 경화판과 칼슘이 50% 이상인 경화판의 발견율은 각각 83%, 94%, 95%였다(23). 이 연구에서 지방을 함유하고 있는 경화판과 드문드문 있는 칼슘(spotty calcium)의 발견율은 각각 70%, 90%였다. 전반적인 경화판의 부피 측정은 칼슘이 많으면 과평가하고, 칼슘이 없으면 저평가하는 것으로 나타났다.

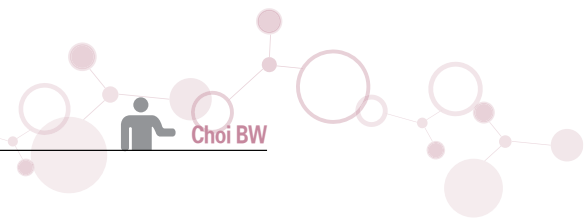
최근 CT를 이용한 경화판 연구는 경화판의 크기, 성분, 양성 재형성(positive remodeling)을 모두 포괄하는 방법으로 진행되고 있다. 최근의 연구에서 급성 심근 중후군 환자에서 발견된 경화판이 크고, 재형성률이 높으며, 칼슘은 없다고 하였다(24). 임상적인 적용을 위하여 CT

에서 발견되는 저밀도의 경화판이 미래 심장 사고의 위험도를 얼마나 예측할 수 있는지에 대한 연구가 필요하다.

심근 관류 및 생존능

최근에는 CT를 이용하여 심근 관류 및 심근 생존능(viability)검사를 할 수 있다고 보고되고 있다. CT를 이용하여 일차통과(first-pass) 관류영상을 얻으면 육안으로 진단 가능한 관류 저하를 발견할 수 있다고 보고되었다(25).

자기공명영상을 이용하여 지연기 조영증강 영상을 얻어 경색 심근을 발견하고 정량화 할 수 있는 방법이 잘 정립되어 있다. 이는 조영제 투여 후 경색 심근에 조영제가 더 많은 농도로 존재하기 때문이며 CT에서도 같은 기전으로 조영증강이 일어난다(Figure 5)(26). CT는 자기공명영상에 비해 부분용적인공물(partial volume artifact)



이 적어 비전층 경색(nontransmural infarction)의 진단에 유리할 것으로 기대된다. 64-절편 CT를 이용한 동물 실험에서 자기공명영상과 같은 정확도로 심근 경색을 발견하고 정량화 할 수 있다는 보고도 있다. 그러나 CT에서 연조직의 대조도가 떨어지는 단점이 지적되고 있다(27, 28).

심실 기능

다검출기 CT를 이용하여 조영증강 관상동맥 촬영을 시행하면 다주기(multiphase) 영상을 재구성하여 심장의 기능 평가가 동시에 가능하다. 심초음파와는 달리 용적 측정 방법이 기하학적 전제에 의존하지 않기 때문에 매우 정확한 측정이 가능하며 재현성이 높다. 그러나 현재의 CT 기술은 시간해상도가 충분하지 않기 때문에 정확한 수축기 말에 영상을 재구성하지 못하여 수축기 말 부피를 실제보다 크게 측정하고 수축기 벽 두께는 얇게 측정하는 경향을 보이며 좌심실 박출계수와 벽 수축이 작게 측정된다(29). 또 부정맥이 있는 환자에서는 CT로 좌심실 기능을 측정하는데 한계가 있다. 그러나 영상처리 소프트웨어의 발전과 시간 해상도의 향상이 가까운 미래에 이러한 문제를 해결할 것으로 예측된다.

판막 질환

CT는 판막 질환을 평가하는 데는 거의 이용되지 않았지만 다주기 영상의 재구성이 가능하게 되면서 판막의 협착이나 부전 평가에도 이용되고 있다. 판막 열림(opening)이 최대 크기가 될 때와 최소 크기가 되는 심장 주기를 선택하여 심판막에 평행한 단면으로 영상을 재구성하면 심판막의 기능 부전에 대한 평가가 가능하다. 퇴행성 대동맥판막 협착은 매우 흔하며, 치료를 결정하는 질환의 심각도는 판막 열림의 넓이에 따라 결정된

다. 판막 열림이 심하게 제한된 환자에서는 비록 증상이 없더라도 수술적 치료가 요구되며, 이의 평가를 위해 수술 전에 심초음파 또는 심도자술이 필요하다. 그러므로 심초음파로 판막 열림의 평가가 어려울 때나 관상동맥질환이 의심되며 동반된 무증상 대동맥판막 협착이 있을 때 CT를 사용할 수 있다. 16-절편 CT의 대동맥판막 협착의 진단 정확도는 민감도 100%, 특이도 93.7%이다(30). CT를 이용하여 승모판막 열림도 정확하게 평가할 수 있다. 일반적으로 5~10%의 환자에서 부적절한 음향창으로 말미암아 심초음파로 승모판의 열림을 평가하기 어렵다. 이런 환자에서 CT는 매력적인 대체 수단이 될 수 있다(31).

한계와 전망

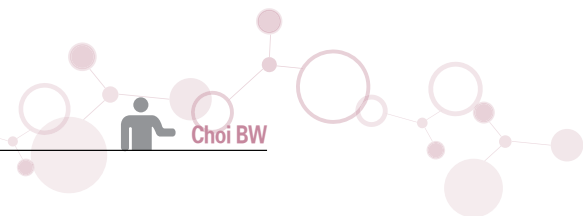
CT 검사의 가장 큰 단점은 방사선 노출이라고 할 수 있다. 검출기의 수가 늘어나면서 방사선 노출도 늘어나는 것이 일반적이다. CT의 평균 유효 방사선량은 14.7mSV로서 관상동맥조영술의 5.6mSV에 비해 2배 이상이다(32). 그러나 전체적인 위험도를 방사선 노출로만 비교할 수는 없다. 방사선 노출에 의한 평생의 암 발생 사망 위험도는 각각 0.07%, 0.02%로서 CT가 3배 이상 높다. 하지만 침습적 관상동맥조영술에서는 방사선 노출 외의 부가적인 심각한 위험이 0.11%에 달한다. 이를 합치면 관상동맥조영술의 사망위험도가 0.13%여서 CT보다 오히려 약 2배가 높다. 게다가 나이가 많은 환자에서 방사선의 위험도는 반으로 줄게 되므로 침습적 조영술에 비해 CT의 위험도는 더욱 줄게 된다(33). 그러므로 전반적인 위험도와 비용효과를 총체적으로 고려하여 검사를 선택해야 할 것이다. 한편 CT 검사의 방사선 노출을 줄이는 노력이 계속되어야 한다. 64-절편 CT에서 심장 주기에 따라 방사선량을 줄여 촬영하면 37%까지, 방사선 발생관의 전압을 낮추면 64%까지 영상의 질 저하 없이 방사

선 노출을 낮출 수 있다(34).

CT 심장 질환 진단의 정확도는 공간 해상도와 시간 해상도의 향상에 따라 더욱 높아질 전망이다, 경화판의 성분, 혈관벽의 재형성, 판막 및 심실의 기능을 진단할 수 있다는 점에서 CT 영상의 역할은 더욱 커지고 확대될 것이다. 이미 개발이 완료되어 임상에서 사용중인 이중 X선 CT는 높은 시간 해상도(82.5ms)를 구현하여 심장 박동 빠르기에 관계없이 진단적 영상을 얻을 수 있고, 판막이나 심근의 기능을 정확히 평가할 수 있으며 방사선 노출을 효율적으로 줄일 수 있다(35). 검출기를 256개로 늘리거나 평판 검출기(flat panel detector)를 장착하여 단 한 번의 회전만으로 심장을 모두 촬영할 수 있는 CT와 2개 이상의 다중 X선 발생 장치가 결합된다면 CT 심장 영상 진단의 정확성과 편리성은 다른 영상 검사의 추종을 불허할 지도 모른다. 가까운 미래에 현재 진행중인 CT 기술의 발전은 지속적인 또는 획기적인 시간 해상도와 공간 해상도의 향상을 실현시켜 심장 영상의 새로운 장을 열 것으로 기대한다.

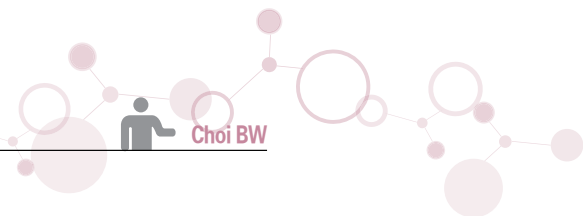
참고 문헌

1. Alfidi RJ, MacIntyre WJ, Haaga JR. The effects of biological motion on CT resolution. *AJR Am J Roentgenol* 1976; 127: 11 - 15.
2. Omran H, Schmidt H, Hackenbroch M, Illien S, Bernhardt P, Sommer T, von der Recke, Fimmers R, Flacke S, Layer G, Pohl C, Luderitz B, Schild H, Sommer T. Silent and apparent cerebral embolism after retrograde catheterisation of the aortic valve in valvular stenosis: a prospective, randomised study. *Lancet* 2003; 361: 1241 - 1246.
3. Budoff MJ, Georgiou D, Brody A, Agatston AS, Kennedy J, Brundage BH, Kennedy J, Wolfkiel C, Stanford W, Shields P, Lewis RJ, Janowitz WR, Rich S, Brundage BH. Ultrafast computed tomography as a diagnostic modality in the detection of coronary artery disease: a multicenter study. *Circulation* 1996; 93: 898 - 904.
4. Stein PD, Beemath A, Kayali F, Skaf E, Sanchez J, Olson RE. Multidetector computed tomography for the diagnosis of coronary artery disease: a systematic review. *Am J Med* 2006; 119: 203 - 216.
5. Schuijff JD, Bax JJ, Shaw LJ, de Roos A, Lamb HJ, von der Wall EE, Wijns W. Meta-analysis of comparative diagnostic performance of magnetic resonance imaging and multislice computed tomography for noninvasive coronary angiography. *Am Heart J* 2006; 151: 404 - 411.
6. Raff GL, Gallagher MJ, O'Neill WW, Goldstein JA. Diagnostic accuracy of noninvasive coronary angiography using 64-slice spiral computed tomography. *J Am Coll Cardiol* 2005; 46: 552 - 557.
7. Budoff MJ, Achenbach S, Blumenthal RS, Carr JJ, Goldin JG, Greenland P, Guerci AD, Lima JA, Rubin GD, Shaw LJ, Wiegers SE. Assessment of coronary artery disease by cardiac computed tomography: a scientific statement from the American Heart Association Committee on Cardiovascular Imaging and Intervention, Council on Cardiovascular Radiology and Intervention, and Committee on Cardiac Imaging, Council on Clinical Cardiology. *Circulation* 2006; 114: 1761 - 1791.
8. McCaig LF, Burt CW. National Hospital Ambulatory Medical Care Survey: 2002 emergency department summary. *Adv Data* 2004: 1 - 34.
9. Hoffmann U, Nagurney JT, Moselewski F, Pena A, Ferencik M, Chae CU, Cury RC, Butler J, Abbara S, Brown DF, Manini A, Nichols JH, Achenbach S, Brady TJ. Coronary Multidetector Computed Tomography in the Assessment of Patients With Acute Chest Pain. *Circulation* 2006; 114: 2251 - 2260.
10. White CS, Kuo D, Kelemen M, Jain V, Musk A, Zaidi E, Read



- K, Sliker C, Prasad R, Prasad R. Chest pain evaluation in the emergency department: can MDCT provide a comprehensive evaluation? *AJR Am J Roentgenol* 2005; 185: 533 - 540
11. Mollet NR, Hoyer A, Lemos PA, Cademartiri F, Sianos G, McFadden EP, Krestin GP, Serruys PW, de Feyter PJ. Value of preprocedure multislice computed tomographic coronary angiography to predict the outcome of percutaneous recanalization of chronic total occlusions. *Am J Cardiol* 2005; 95: 240 - 243.
12. Pache G, Saueressig U, Frydrychowicz A, Foell D, Ghanem N, Kotter E, Geibel-Zehender A, Bode C, Langer M, Bley T, Bley T. Initial experience with 64-slice cardiac CT: non-invasive visualization of coronary artery bypass grafts. *Eur Heart J* 2006; 27: 976 - 980.
13. Malagutti P, Nieman K, Meijboom WB, van Mieghem CA, Pugliese F, Cademartiri F, Mollet NR, Boersma E, de Jaegere PD, de Feyter PJ. Use of 64-slice CT in symptomatic patients after coronary bypass surgery: evaluation of grafts and coronary arteries. *Eur Heart J* 2006.
14. Gilard M, Cornily JC, Pennec PY, Joret C, Le Gal G, Mansourati J, Blanc JJ, Bosch J. Accuracy of multislice computed tomography in the preoperative assessment of coronary disease in patients with aortic valve stenosis. *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 2020 - 2024.
15. Holmes DR Jr, Leon MB, Moses JW, Popma JJ, Cutlip D, Fitzgerald PJ, Brown C, Fischell T, Wong SC, Midei M, Snead D, Kuntz RE. Analysis of 1-year clinical outcomes in the SIRIUS trial: a randomized trial of a sirolimus-eluting stent versus a standard stent in patients at high risk for coronary restenosis. *Circulation* 2004; 109: 634 - 640.
16. Rixe J, Achenbach S, Ropers D, Baum U, Kuettner A, Ropers U, Bautz W, Daniel WG, Anders K. Assessment of coronary artery stent restenosis by 64-slice multi-detector computed tomography. *Eur Heart J* 2006; 27: 567 - 572.
17. Van Mieghem CA, Cademartiri F, Mollet NR, Malagutti P, Valgimigli M, Meijboom WB, Pugliese F, McFadden EP, Ligthart J, Runza G, Bruining N, Smits PC, Regar E, van der Giessen WJ, Sianos G, van Domburg R, de Jaegere P, Krestin GP, Serruys PW, de Feyter PJ. Multislice spiral computed tomography for the evaluation of stent patency after left main coronary artery stenting: a comparison with conventional coronary angiography and intravascular ultrasound. *Circulation* 2006; 114: 645 - 653.
18. Agatston AS, Janowitz WR, Hildner FJ, Zusmer NR, Viamonte M Jr, Detrano R. Quantification of coronary artery calcium using ultrafast computed tomography. *J Am Coll Cardiol* 1990; 15: 827 - 832.
19. Detrano RC, Anderson M, Nelson J, Wong ND, Carr JJ, McNitt-Gray M, Bild DE. Coronary calcium measurements: effect of CT scanner type and calcium measure on rescan reproducibility-MESA study. *Radiology* 2005; 236: 477 - 484.
20. Wang L, Jerosch-Herold M, Jacobs DR Jr, Shahar E, Detrano R, Folsom AR. Coronary artery calcification and myocardial perfusion in asymptomatic adults: the MESA (Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis). *J Am Coll Cardiol* 2006; 48: 1018 - 1026.
21. Moselewski F, O'Donnell CJ, Achenbach S, Ferencik M, Massaro J, Nguyen A, Cury RC, Abbara S, Jang IK, Brady TJ, Hoffmann U. Calcium concentration of individual coronary calcified plaques as measured by multidetector row computed tomography. *Circulation* 2005; 111: 3236 - 3241.
22. Van Mieghem CA, McFadden EP, de Feyter PJ, Bruining N, Schaer JA, Mollet NR, Cademartiri F, Goedhart D, de Winter S, Granillo GR, Valgimigli M, Mastik F, van der Steen AF, van der Giessen WJ, Sianos G, Backx B, Morel MA, van Es GA, Zalewski A, Serruys PW. Noninvasive detection of subclinical

- coronary atherosclerosis coupled with assessment of changes in plaque characteristics using novel invasive imaging modalities: the Integrated Biomarker and Imaging Study (IBIS). *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 1134 - 1142.
23. Leber AW, Becker A, Knez A, von Ziegler F, Sirol M, Nikolaou K, Ohnesorge B, Fayad ZA, Becker CR, Reiser M, Steinbeck G, Boekstegers P. Accuracy of 64-slice computed tomography to classify and quantify plaque volumes in the proximal coronary system: a comparative study using intravascular ultrasound. *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 672 - 677.
 24. Hoffmann U, Moselewski F, Nieman K, Jang IK, Ferencik M, Rahman AM, Cury RC, Abbara S, Joneidi-Jafari H, Achenbach S, Brady TJ. Noninvasive assessment of plaque morphology and composition in culprit and stable lesions in acute coronary syndrome and stable lesions in stable angina by multidetector computed tomography. *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 1655 - 1662.
 25. George RT, Silva C, Cordeiro MA, DiPaula A, Thompson DR, McCarthy WF, Ichihara T, Lima JA, Lardo AC. Multidetector computed tomography myocardial perfusion imaging during adenosine stress. *J Am Coll Cardiol* 2006; 48: 153 - 160.
 26. Gerber BL, Belge B, Legros GJ, Lim P, Poncelet A, Pasquet A, Gisellu G, Coche E, Vanoverschelde JL. Characterization of acute and chronic myocardial infarcts by multidetector computed tomography: comparison with contrast-enhanced magnetic resonance. *Circulation* 2006; 113: 823 - 833.
 27. Baks T, Cademartiri F, Moelker AD, Weustink AC, van Geuns RJ, Mollet NR, Krestin GP, Duncker DJ, de Feyter PJ. Multislice computed tomography and magnetic resonance imaging for the assessment of reperfused acute myocardial infarction. *J Am Coll Cardiol* 2006; 48: 144 - 152.
 28. Lardo AC, Cordeiro MA, Silva C, Amado LC, George RT, Saliaris AP, Schuleri KH, Fernandes VR, Zviman M, Nazarian S, Halperin HR, Wu KC, Hare JM, Lima JA. Contrast-enhanced multidetector computed tomography viability imaging after myocardial infarction: characterization of myocyte death, microvascular obstruction, and chronic scar. *Circulation* 2006; 113: 394 - 404.
 29. Belge B, Coche E, Pasquet A, Vanoverschelde JL, Gerber BL. Accurate estimation of global and regional cardiac function by retrospectively gated multidetector row computed tomography: comparison with cine magnetic resonance imaging. *Eur Radiol* 2006; 16: 1424 - 1433.
 30. Feuchtner GM, Dichtl W, Friedrich GJ, Frick M, Alber H, Schachner T, Bonatti J, Mallouhi A, Frede T, Pachinger O, zur Nedden D, Muller S. Multislice computed tomography for detection of patients with aortic valve stenosis and quantification of severity. *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 1410 - 1417.
 31. Messika-Zeitoun D, Serfaty JM, Laissy JP, Berhili M, Brochet E, Iunq B, Vahanian A. Assessment of the mitral valve area in patients with mitral stenosis by multislice computed tomography. *J Am Coll Cardiol* 2006; 48: 411 - 413.
 32. Coles DR, Smail MA, Negus IS, Wilde P, Oberhoff M, Karsch KR, Baumbach A. Comparison of radiation doses from multislice computed tomography coronary angiography and conventional diagnostic angiography. *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 1840 - 1845.
 33. Zanzonico P, Rothenberg LN, Strauss HW. Radiation exposure of computed tomography and direct intracoronary angiography: risk has its reward. *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 1846 - 1849.
 34. Hausleiter J, Meyer T, Hadamitzky M, Huber E, Zankl M, Martinoff S, Kastrati A, Schomig A. Radiation dose estimates from cardiac multislice computed tomography in daily practice: impact of different scanning protocols on effective dose estimates. *Circulation* 2006; 113: 1305 - 1310.



35. Johnson TR, Nikolaou K, Wintersperger BJ, Leber AW, von Ziegler F, Rist C, Buhmann S, Knez A, Reiser MF, Becker CR. Dual-source CT cardiac imaging: initial experience. *Eur Radiol* 2006; 16: 1409 - 1415.
36. Ehara M, Surmely JF, Kawai M, Katoh O, Matsubara T, Terashima M, Tsuchikane E, Kinoshita Y, Suzuki T, Ito T, Takeda Y, Nasu K, Tanaka N, Murata A, Suzuki Y, Sato K, Suzuki T. Diagnostic accuracy of 64-slice computed tomography for detecting angiographically significant coronary artery stenosis in an unselected consecutive patient population: comparison with conventional invasive angiography. *Circ J* 2006; 70: 564 - 571.
37. Fine JJ, Hopkins CB, Ruff N, Newton FC. Comparison of accuracy of 64-slice cardiovascular computed tomography with coronary angiography in patients with suspected coronary artery disease. *Am J Cardiol* 2006; 97: 173 - 174.
38. Leber AW, Knez A, von Ziegler F, Becker A, Nikolaou K, Paul S, Wintersperger B, Reiser M, Becker CR, Steinbeck G, Boekstegers P. Quantification of obstructive and non-obstructive coronary lesions by 64-slice computed tomography: a comparative study with quantitative coronary angiography and intravascular ultrasound. *J Am Coll Cardiol* 2005; 46: 147 - 154.
39. Leschka S, Alkadhi H, Plass A, Desbiolles L, Grunenfelder J, Marincek B, Wildermuth S. Accuracy of MSCT coronary angiography with 64-slice technology: first experience. *Eur Heart J* 2005; 26: 1482 - 1487.
40. Mollet NR, Cademartiri F, van Mieghem CA, Runza G, McFadden EP, Baks T, Serruys PW, Krestin GP, de Feyter PJ. High-resolution spiral computed tomography coronary angiography in patients referred for diagnostic conventional coronary angiography. *Circulation* 2005; 112: 2318 - 2323.
41. Pugliese F, Mollet NR, Runza G, van Mieghem C, Meijboom WB, Malagutti P, Baks T, Krestin GP, deFeyter PJ, Cademartiri F. Diagnostic accuracy of non-invasive 64-slice CT coronary angiography in patients with stable angina pectoris. *Eur Radiol* 2006; 16: 575 - 582.
42. Ropers D, Rixe J, Anders K, Kuttner A, Baum U, Bautz W, Daniel WG, Achenbach S. Usefulness of multidetector row spiral computed tomography with 64- x 0.6-mm collimation and 330-ms rotation for the noninvasive detection of significant coronary artery stenoses. *Am J Cardiol* 2006; 97: 343 - 348.
43. Leber AW, Knez A, Becker A, Becker C, von Ziegler F, Nikolaou K, Rist C, Reiser M, White C, Steinbeck G, Boekstegers P. Accuracy of multidetector spiral computed tomography in identifying and differentiating the composition of coronary atherosclerotic plaques: a comparative study with intracoronary ultrasound. *J Am Coll Cardiol* 2004; 43: 1241 - 1247.
44. Viles-Gonzalez JF, Poon M, Sanz J, Rius T, Nikolaou K, Fayad ZA, Fuster V, Badimon JJ. In vivo 16-slice, multidetector-row computed tomography for the assessment of experimental atherosclerosis: comparison with magnetic resonance imaging and histopathology. *Circulation* 2004; 110: 1467 - 1472.
45. Schroeder S, Kuettner A, Leitritz M, Janzen J, Kopp AF, Herdeg C, Heuschmid M, Burgstahler C, Baumbach A, Wehrmann M, Claussen CD. Reliability of differentiating human coronary plaque morphology using contrast-enhanced multislice spiral computed tomography: a comparison with histology. *J Comput Assist Tomogr* 2004; 28: 449 - 454.
46. Becker CR, Nikolaou K, Muders M, Babaryka G, Crispin A, Schoepf UJ, Loehrs U, Reiser MF. Ex vivo coronary atherosclerotic plaque characterization with multi-detector-row CT. *Eur Radiol* 2003; 13: 2094 - 2098.
47. Schroeder S, Kopp AF, Baumbach A, Meisner C, Kuettner A,

Georg C, Ohnesorge B, Herdeg C, Claussen CD, Karsch KR.
Noninvasive detection and evaluation of atherosclerotic co-

ronary plaques with multislice computed tomography. J Am
Coll Cardiol 2001; 37: 1430 - 1435.



Peer Reviewer Commentary

최 연 현 (성균관의대 영상의학과)

심장혈관의 CT 기법이 최근에 눈부시게 발달하여 전 세계적으로 임상적인 적용이 활발하게 시도되고 있다. 우리나라에도 다중검출기 CT가 급속하게 보급되면서 관동맥 CT 혈관조영술에 대한 관심이 높아졌으나 임상적 적용에 대한 정보가 충분하게 보급되지 못한 상황이었다. 본 논문은 관동맥 질환의 검색과 급성 흉통의 진단, CT의 진단적 효율성, 경화반의 발견과 특성화, 판막 질환과 심실 기능의 평가 등 CT의 다양한 심장 분야 적용에 대해 간결하게 기술하였다. 심장의 운동에 의한 관동맥 영상화의 한계와 방사선 피폭의 우려도 미래의 기술적 발달에 의해 극복될 수 있음을 희망적인 메시지로 전달하였다. 선천성 심질환 일부에 대해서는 이미 카테터 심장 조영술을 대체할 수 있는 수준으로 활발히 이용되고 있으나 지면의 부족으로 기술하지 못한 것으로 생각된다. 허혈성 심질환의 조기 발견에 MDCT가 적극적으로 이용된다면 국민들의 수명 연장과 의료비 절감을 기대할 수 있기에 본 논문이 클리닉과 의료행정체계에 긍정적인 영향을 미칠 것을 기대한다.