

MDCT 관동맥조영술을 이용한 관동맥 경화반의 발견과 협착 평가

Noninvasive Detection of Coronary Atherosclerotic Plaques and Assessment of Stenosis Degree at Multidetector CT Coronary Angiography

최 연 현 | 성균관대 영상의학과 | Yeon Hyeon Choe, MD

Department of Radiology, Sungkyunkwan University School of Medicine

E-mail : yhchoe@smc.samsung.co.kr

J Korean Med Assoc 2007; 50(2): 109 - 119

Abstract

64-slice MDCT has shown a sensitivity of 86~99% and a specificity of 79~96% in detecting lesions >50% stenosis. Spatial resolution of current MDCT technology enables reliable detection of nonobstructing noncalcific plaques as well as significantly stenotic lesions. CT densitometry on the plaques may give an insight on vulnerability of the lesions defined as less than 30~50 HU. MDCT coronary angiography has a tendency of overestimation of stenosis degree especially in distal segments of left anterior descending and circumflex arteries and their branches and in heavily calcified lesions as compared with quantitative catheter coronary angiography. Semi-automatic vessel segmentation techniques for coronary CT angiography may help assess the stenosis degree quantitatively. Recently developed dual-source 128-slice CT has shown diagnostic quality images in patients with high heart rates. Along with forth-coming 256-slice CT, new CT technologies are expected to enable highly reliable detection of coronary artery plaques and accurate estimation of stenosis degree.

Keywords : Computed tomography; Coronary CT angiography; Coronary atherosclerosis

핵심용어 : 전산화단층촬영; 관동맥질환

서론

MDCT(multidetector CT)의 출현으로 관동맥의 비침습적 영상화가 임상 현장의 현실이 되었다. 이전의 전자선 CT(Electron-Beam CT)는 50msec의 시간 해상도를 보였지만, 고가의 장비일 뿐 아니라 공간 해상도에 한계가 있었고 다른 장기의 진단에 활용되기 어려운 단점으로 인해 널리 보급되지 못하였다. 최근에 비약적인 발전을 거듭하고 있는 MDCT 혈관조영술(CT Angio-

raphy, CTA)은 비침습적으로 관동맥을 직접 영상화 할 수 있기 때문에 심초음파검사나 핵의학검사와 구별되는 장점을 가진다. 특히 비전형적 협심증 환자에서 심각한 협착이 없음을 확인할 수 있고 협착이 심한 환자에서는 카테터 관동맥조영술과 관동맥중재술의 안내 역할을 기대할 수 있다.

관동맥 질환의 위험인자를 가진 환자군에서 관동맥 경화반의 유무를 파악할 수 있기 때문에 장래의 심각한 심장 사건을 예방하고 미리 치료할 수 있는 장점이 있다.



Figure 1. 64-year-old woman with chest pain. Volume-rendered (A) and maximum intensity projection (B) images of 64-slice CT show mild stenosis (arrows) in proximal left anterior descending branch. Short-axial reformatted image (C) of the lesion shows an eccentric noncalcific plaque (arrow). Mean ROI of the plaque region was 46 HU suggestive of lipid-rich content in the plaque.

취약한 동맥 경화반의 발견

취약한 동맥경화반은 경화반 모자(fibrous cap)의 균열

이나 파열로 인해 혈관내 급성 혈전 형성과 원위부 색전, 혈관 폐쇄 등 심각한 상황을 초래할 수 있는 경화반을 지칭한다(1). 동맥경화의 치유과정에서 형성된 섬유성 모자의 용

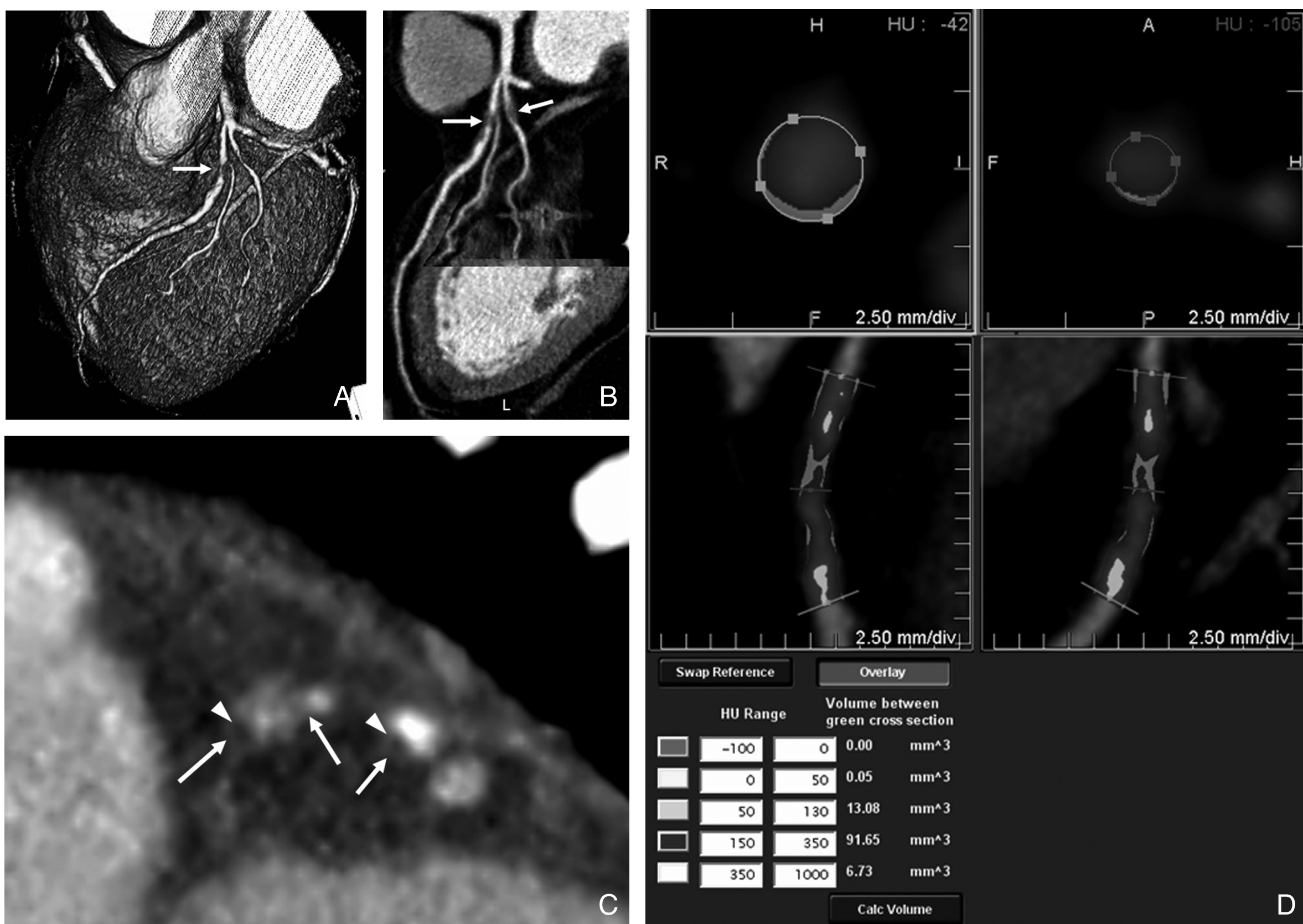


Figure 2. 64-year-old male with chest pain. Volume-rendered (A) and maximum intensity projection (B) images show stenosis (arrow) in the proximal left anterior descending branch, first diagonal branch and ramus intermedius. Short-axial reformatted image (C) shows eccentric plaques (arrows) in these vessels. Also note hypo-attenuated areas (arrowheads) suggestive of lipid content. Plaque volume was measured using a semiautomated method (D). It showed that plaque consisted of mostly fibrous component (50~130 HU) and the volume of the plaque was 13.13mm³.

해에 관련된 많은 효소들이 있으며 여러가지 원인으로 인해 섬유성 모자가 얇아지면 경화반의 균열, 파열이 발생할 수 있고 내부의 지질핵이 경화반 용적의 50% 이상이 되거나 경화반 내부의 출혈이 있으면 취약한 경화반의 요소를 가진 것으로 볼 수 있다. 취약한 동맥 경화반은 조직병리학의 현미경적 기준으로 판단해야 하는 것이지만 경동맥 이상의 대혈관에서는 섬유성 모자의 두께, 큰 지질핵, 경화반 내부의 출혈 등을 MRI나 CT를 통해 비침습적으로 확인할 수 있다 (2). 관동맥은 작은 혈관이기 때문에 경화반의 비침습적인 특성 파악에 어려움이 있었으나, 최근에 MDCT가 0.33mm의 절편해상도에 512 × 512 image matrix 또는 그 이상의 공간 해상도(0.33mm × 0.35mm × 0.35mm)를 보여 관동

맥 경화반과 혈관 내부를 구별할 수 있게 되었다. MDCT를 이용하여 좌주관동맥 전장과 좌전하행지, 회선지, 우관동맥의 근위부와 중간부분의 경화반을 발견하고 경화반의 특성 파악, 협착 정도를 평가할 수 있으며, 이러한 경화반을 발견하기 위해서 혈관의 장경에 직각인 단면을 얻어 확대한 영상을 자세히 관찰하여야 한다(Figure 1~3).

MDCT를 통해 관동맥의 섬유성 모자 유무나 출혈 유무는 확인하기 어려우나 경화반 내에 보다 낮은 감쇠계수를 가지는 국소를 육안적으로 확인할 수 있으며 관심영역(region of interest, ROI)을 측정하여 마이너스(minus) 값을 보인다면 지질 성분으로 간주하여도 좋다. 연구자들에 의하면 지질이 풍부한 부분(lipid-rich area), 섬유성 부분(fibrous

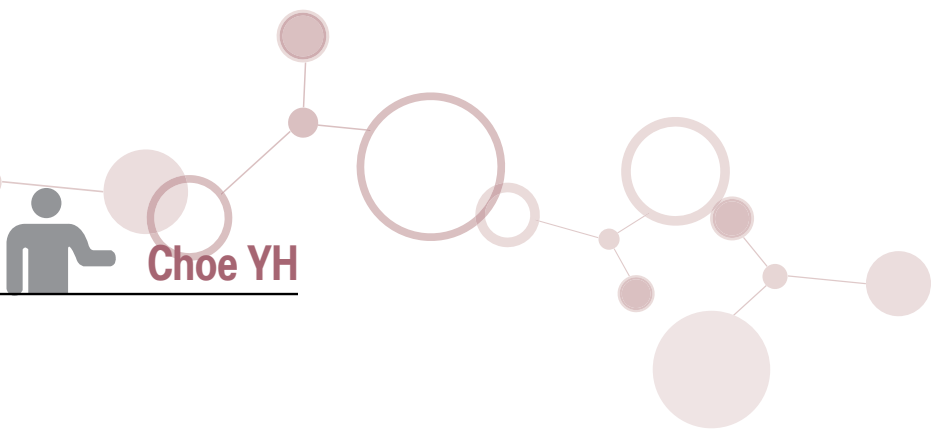


Figure 3. 48-year-old male with acute myocardial infarction. CT reformatted images (A) show a noncalcific plaque (arrow) in left main coronary artery. Intravascular ultrasonography (B) confirmed presence of fibrous plaque (arrow) without foci of hypoechoic lipid component.

area), 석회성 부분(calcific area)의 평균 감쇠계수는 각각 14 ~ 51HU, 70 ~ 116HU, 419 ~ 715HU였다(3 ~ 9). 따라서 경화반 전체의 ROI의 측정치가 30HU 이하라면 취약한 경화반으로 간주할 수 있으며 30 ~ 70HU는 중간 성분, 70 ~ 130HU는 섬유성 경화반, 130HU 이상은 석회성 경화반으로 간주한다. 그러나 이러한 기준은 아직 정립되지 않았으며 더 많은 연구를 필요로 한다.

Hoffmann 등(10)에 의하면 급성 관동맥 증후군(n=14)과 안정형 협심증(n=9)을 가진 환자군 사이에 CTA로 관찰한 경화반의 양상이 달랐으며 급성 관동맥 증후군에서 경화반 면적이 더 크고 재형성(remodeling) 지수(최대협착점과 기준점의 혈관외경 면적비)가 더 컸으며 비석회성 병변의 빈도가 100%와 77%로 각각 나타났다.

최근의 발달된 소프트웨어를 사용하면 국소 경화반의 용적을 측정할 수 있으며 혈관의 내경과 경화반을 반자동으로 구별해 위에 언급한 감쇠계수별로 경화반의 성분을 파악해 성분별 용적을 구별할 수 있다(Figure 2). 그러나 광범위한 경화반의 용적 측정에는 시간 소모가 많아 실용적이지 않다.

경화반 발견에 가장 큰 장애가 되는 것은 심장박동에 의한 인공물이다. 심박수가 60회 이하이면 확장기 중간 시점의 영상합성으로 적절한 관동맥 영상을 얻으나 65회 이상이면 약간의 운동성 인공물이 특히 우관동맥, 좌회선지 중간 부위에 나타나기 쉬우며 70회 이상이면 전체적으로 인공물이 나타나게 된다. 심박수가 빠르더라도 검사중 균일한 심

박수를 보이면 확장기 초기의 영상합성이나 R peak로부터 일정한 간격을 둔 시점에 합성하면 진단적인 영상을 얻을 수 있다. 그러나 심박수를 검사전 베타차단제 투여로 60회 이하로 낮추는 것이 바람직하다. 또 호흡정지 후 5~6초가 지나면 심박수의 균일성이 흐트러지기 쉽기 때문에 최신의 장비는 5~10초 이내에 신속히 검사를 마친다. 인공물의 발생에는 심박수의 불균일이 빠른 심박수보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(11). 최근에 개발된 이중 선원(dual-source) CT는 심박수에 상관없이 진단적인 영상을 얻을 수 있다고 알려지고 있으며 현재 연구중인 256-절편 CT도 종축 스캔 범위가 12.8cm로서 갠트리 한 번 회전에 심장 전체가 스캔될 수 있어 영상의 질이 현저히 개선될 것으로 보인다. 또한 해상도가 향상된 감지판(detector panel)의 개발에 의해 공간해상도가 현저히 개선될 것으로 생각된다.

관동맥 협착의 평가

진단적 수준의 영상을 얻은 후에 병변의 협착 정도가 중재적 시술 또는 우회로 수술을 시행할 만큼 의미있는 협착인지 구별해야 한다. 협착 부위의 발견을 위해서 축상영상(axial image)과 3차원 영상을 검토한다. 3차원 영상은 체적입체영상(volume-rendered image), 최대강도투사영상(maximum intensity projection image)이 있으며 혈관

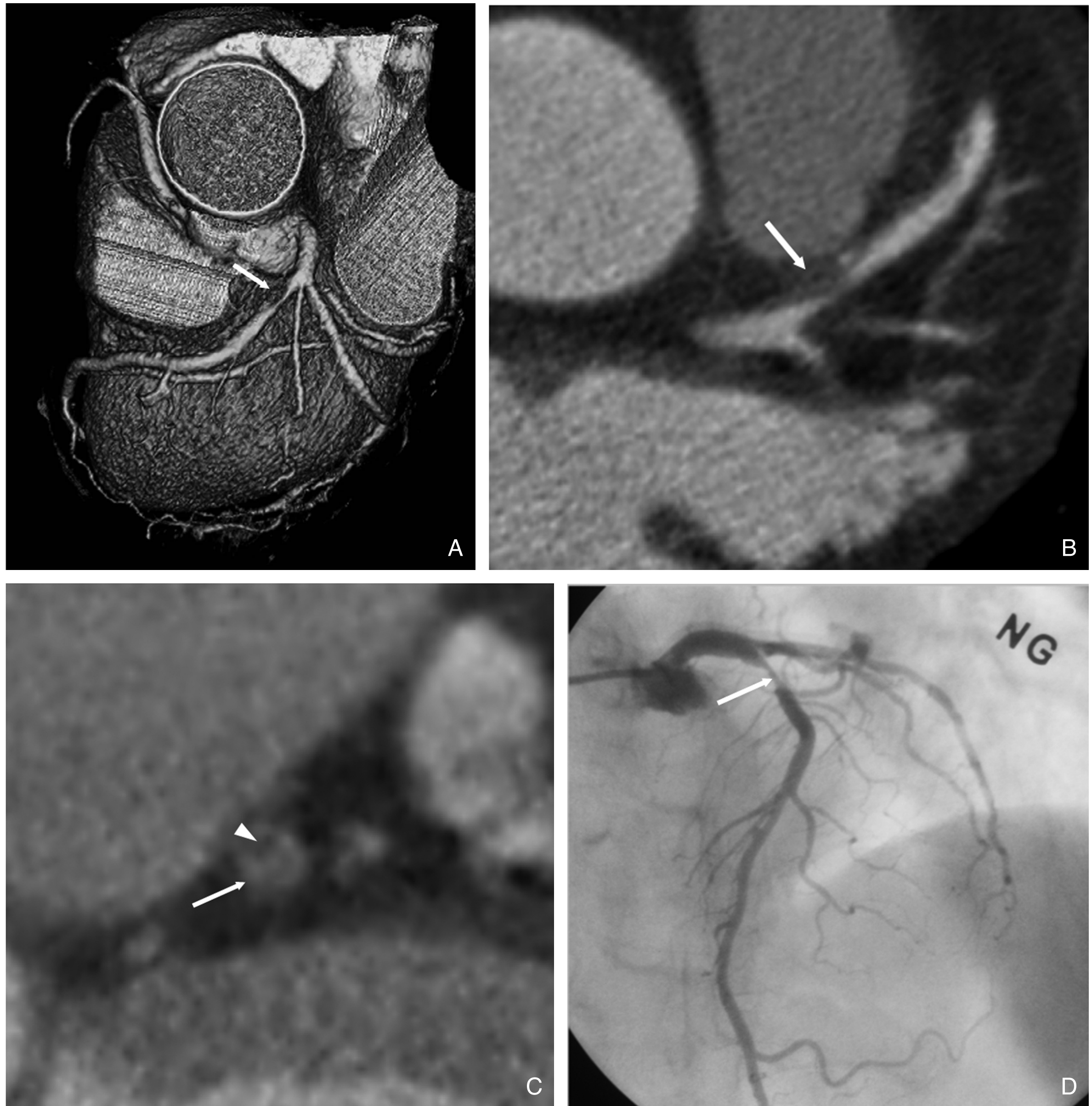


Figure 4. 67-year-old female with chest pain. Volume-rendered (A) and axial reformatted (B) images show stenosis (arrow) in the proximal left anterior descending branch. Short-axial reformatted image (C) of the vessel shows significant stenosis (arrow) with eccentric lumen and lipid area (arrowhead). Catheter angiography (D) correlated well with CT angiography in visual grading of stenosis (arrow) of the coronary artery.

분석을 위해서는 곡선형평면합성(curved planar reformation) 방법을 이용한다(Figure 4). 협착 부위가 발견되면 혈관의 횡단면을 얻어 혈관 내경과 경화반의 두께를 측정하는

것이 바람직하다. 협착 부위 내경과 정상 부위 혈관의 내경을 비교하여 협착 정도를 구한다. 협착 부위의 내경과 외경을 비교하는 것은 remodeling이 있는 경우에 협착을 과대

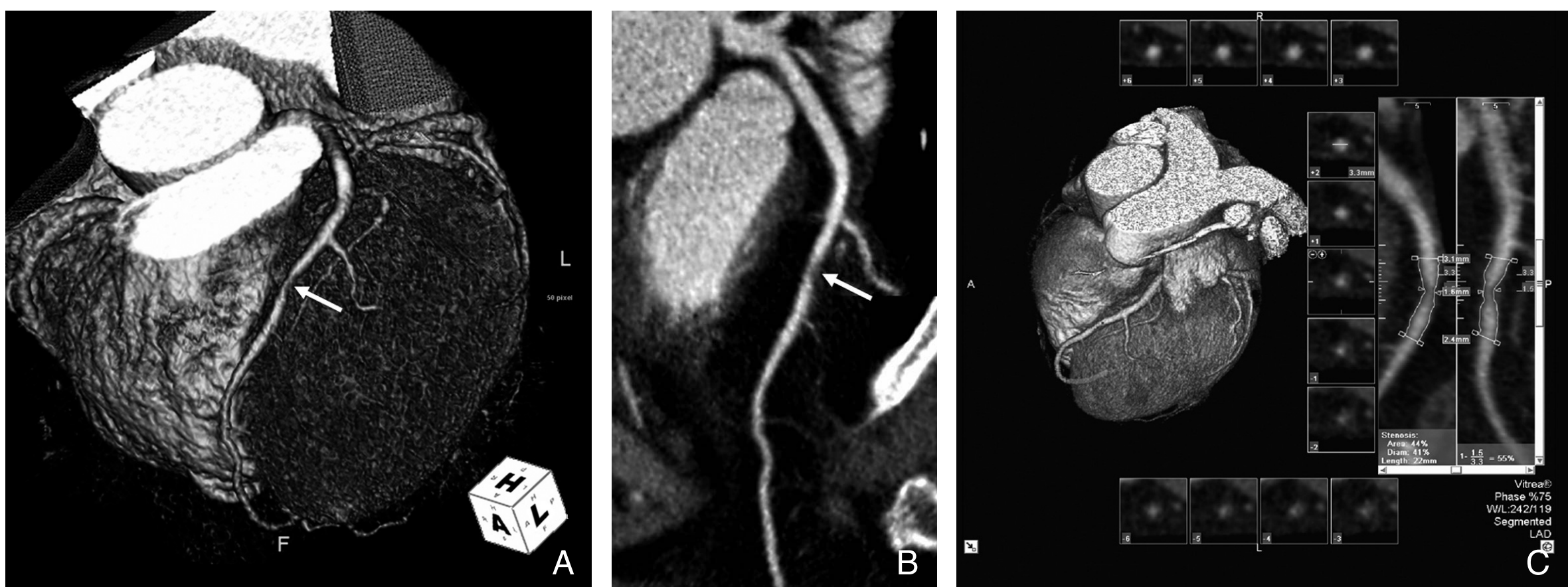
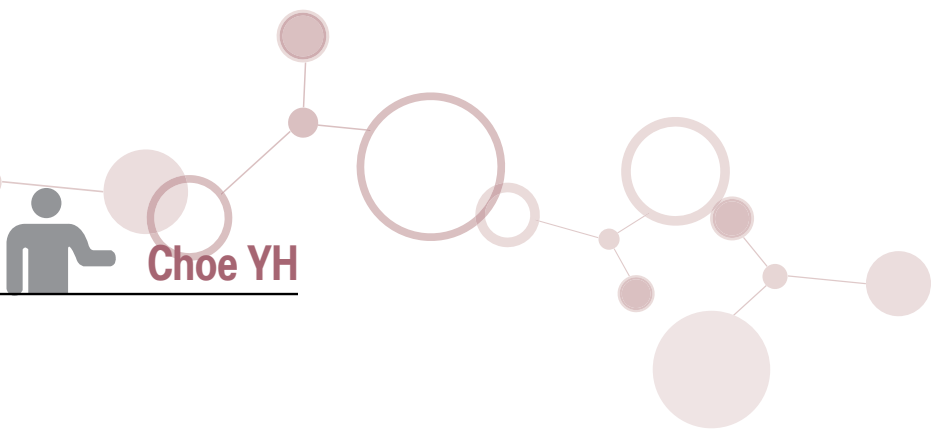


Figure 5. 66-year-old female with chest pain. Volume-rendered (A) and maximum intensity projection (B) images show stenosis (arrow) in the mid left anterior descending branch. Semiautomatic quantitative approach (C) revealed a 55% stenosis.

평가할 수 있으며, 반면에 협착 부위 직경과 근위부 혈관 직경을 비교하는 방법은 remodeling이 심하거나 협착 분절이 긴 경우에 오류의 가능성이 있다.

육안적으로 협착 정도를 판단하는 것은 협착을 과대평가하는 것으로 알려져 있다. 육안적 평가가 보편적인 방법이지만, 카테터 관동맥조영술에서 사용하는 계량적 평가(quantitative coronary angiography, QCA)와 동일한 방법을 쓰는 것이 임상적인 판단의 의사소통에 도움이 된다. 16-절편 CT를 이용한 한 연구에 의하면 29명 환자 42 병소에 대해 MDCT와 카테터 관동맥조영술 QCA가 협착 정도를 평가함에 있어 우수한 상관 관계($r^2=0.93$)를 보였지만 MDCT가 과대평가하는 경향이 있었고(평균값 차이, bias = 4% ~ 8%), 병변의 길이에 대해서 중등도의 일치도($r^2=0.54$)를 보였다(12). Leber 등(13)에 의하면 55명의 환자에서 64-절편 CT를 이용하여 협착 정도를 평가하고 카테터 QCA와 비교하였을 때 $r=0.54$ 로 상관계수는 높지 않았으며 50% 이상과 75% 이상의 협착에 대해 73%, 80%의 예민도를 보였고 특이도는 97%였다. QCA와 비교가 가능한 798 분절 중 90협착 분절(90/141), 638정상 분절(638/657)에서 두 방법이 일치하였으며, QCA상 협착 분절 20개가 CTA에 병변이 보이지 않았고, 12 분절은 협착의 과소평가, QCA 정상 분절 19개의 협착 판정, 19분절의 협착 과대평가가 있었다. 흥미로운 것은 QCA 정상 분절 19개를 CTA

에서 협착 판정한 예들 중 5예에서 혈관내초음파검사(IVUS)를 시행하였는데 모두 경화반이 관찰되어 내경만을 관찰하는 QCA에 대한 CTA의 장점을 시사한다. 협착을 과대 평가한 대부분의 예는 원위부 병변이거나 심한 석회와 연관되었다. MDCT를 IVUS와 비교하였을 때 84%의 병변이 정확히 발견되었으며 평균 경화반 면적과 협착 정도는 각각 7.3mm^2 와 8.1mm^2 ($p<0.03$, $r=0.73$), 41.1%와 50.4% ($p<0.001$, $r=0.61$)였다. Caussin 등(14)은 40명의 환자에서 최소 내경 면적을 64-절편 CT와 IVUS에서 비교하였는데, 양자간에 $r=0.88$ 로 상관 관계가 높았으며 4mm^2 이하의 협착 병변에 대한 CT의 예민도와 특이도는 87%와 72%였다.

혈관 협착 평가의 재현성을 위해서는 자동화된 소프트웨어에 의해 측정하는 것이 바람직하며 현재 상용화된 프로그램이 있고(Figure 5) 여러 연구자들에 의해 소프트웨어가 개발, 개선되고 있다(15, 16). 그러나 이러한 소프트웨어의 적용을 위해서는 우수한 품질의 영상 획득이 우선되어야 한다. 혈관의 한 두 지점에 마우스를 클릭하면 혈관의 분절화(segmentation), 중심선의 추출, 영상 용적의 재합성, 혈관 장축과 단축 단면의 윤곽 발견, 혈관 형태학적 매개변수의 정량화 과정을 통해 협착부위에 대해 정량적으로 분석할 수 있다(17). 이러한 소프트웨어를 사용할 때 혈관 내경과 외경의 윤곽이 정확히 발견되었는지 검토하고 수정하는 과정이

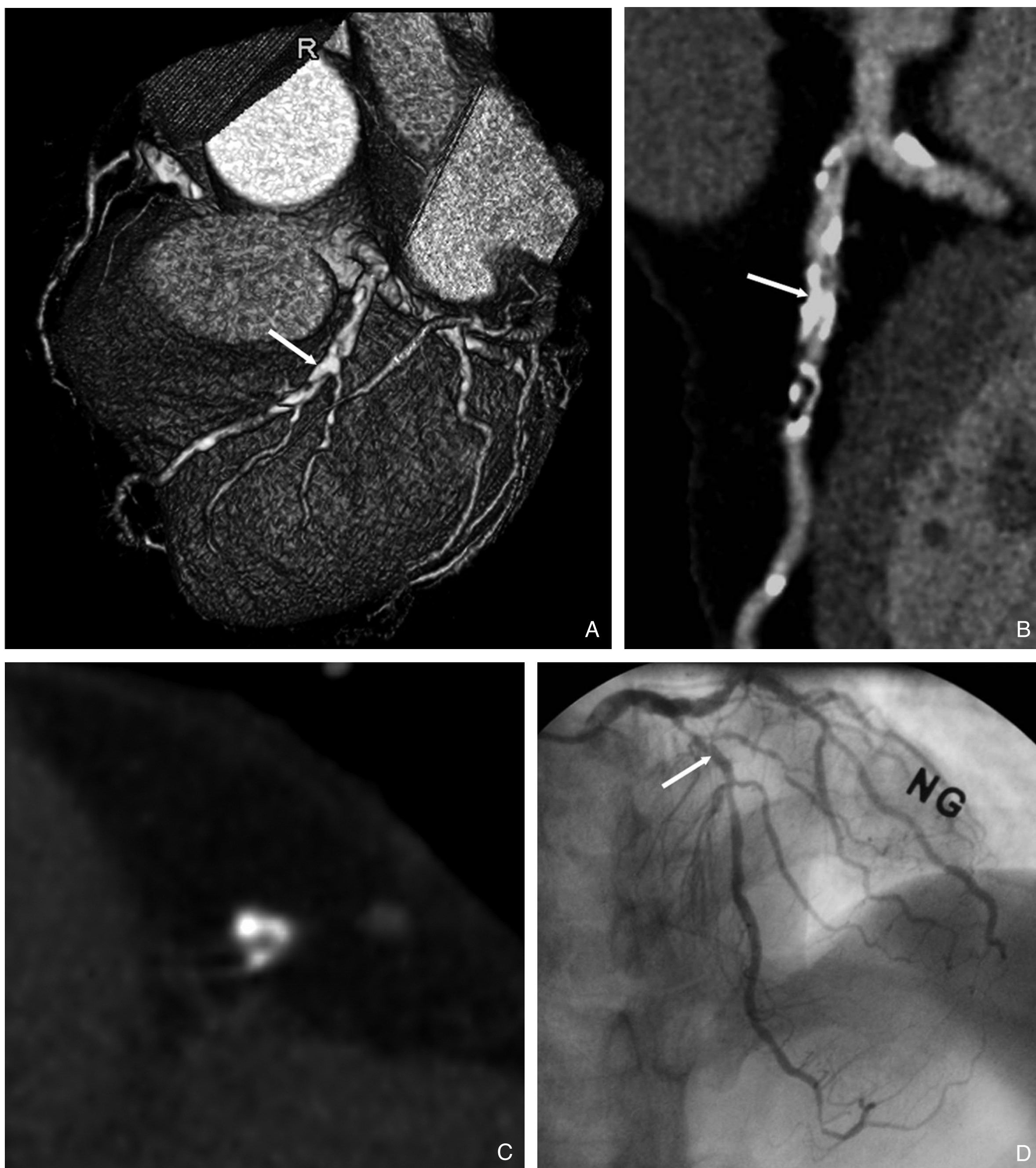
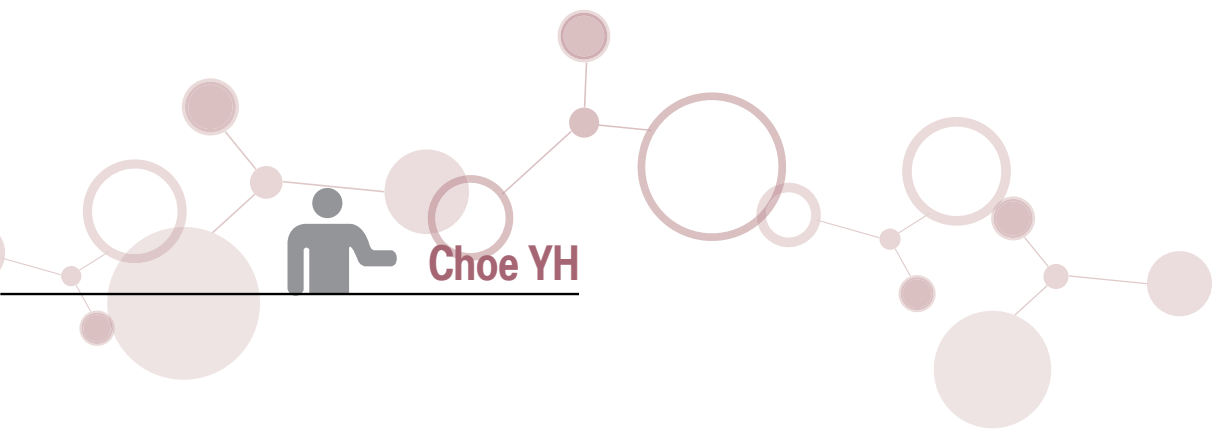


Figure 6. 65-year-old male with previous myocardial infarction. There are multiple calcifications in proximal to mid left anterior descending branch. Volume-rendered (A) and maximum intensity projection (B) images show dense tubular calcifications (arrows) in mid left anterior descending branch adjacent to the origin of 1st diagonal branch. Short-axial image (C) shows an almost obscured lumen in that segment. However, catheter angiography reveals only mild stenosis in the same segment. This case illustrates an example of overestimation of the stenosis degree at CT angiography due to blooming artifact of calcium.



필요하며 경우에 따라서는 상당한 시간을 소모하여야 한다.

심장의 MRI나 핵의학적 검사와 유사하게 아데노신을 주입하면서 심각한 경화성 병변에 의한 심근 허혈을 CT로 관찰할 수 있다. CT의 관류 결손으로 나타나는, 심근 허혈을 유발하는 수준의 협착이 어느 정도인지는 아직 알려지지 않았다. CT의 조직대조도가 MRI에 비해 미흡하나 해상도가 탁월하므로 관동맥 조영과 동시에 심근의 관류 상태를 파악할 수 있다는 것이 장점이다. 다만 스트레스 시기와 휴식기에 두 번의 CT 검사를 시행해야 하므로 방사선량 조정(modulation)으로 방사선량을 감소시키든지, 유효 방사선량이 2~3 mSv로 획기적으로 줄어든 최신 CT 장비로 검사하는 것이 바람직하다.

협착 평가의 장애요인

CTA 영상의 품질이 양호한 환자에서 협착평가에 가장 큰 장애는 석회로 혈관 내경이 가려지는 것이다. 이것은 석회의 팽창 효과(blooming effect) 때문이며 석회의 양이 많고 치밀할수록 실제보다 혈관 내경이 가려지게 되어 협착 평가가 과장되게 된다(Figure 6). 따라서 석회 수치(calcium score)가 높은 경우 카테터 관동맥조영술이 정확한 협착평가를 위해 권장된다. 또 석회 수치가 너무 높은 환자(Agaston 지수 400 이상)에는 조영제를 사용한 CTA를 시행하지 않을 것이 권장되기도 한다. 그러나 석회의 양이 국소적으로 많지 않은 경우에는 석회의 팽창 효과를 고려하더라도 석회로 인한 협착이 50% 이하인 경우가 많으며 이러한 경우에 동반된 비석회성 경화반의 발견을 위해 CTA를 이용하는 것이 좋다.

협착 평가의 다른 장애 요인으로 불충분한 조영제 농도를 들 수 있다. 조영제 농도가 불충분할 때 3차원 영상에 인공적인 협착이 발생할 수 있다. 특히 volume-rendered image에 조영제의 농도에 의한 인공 협착으로 진단이 어렵게 되며 같은 환자의 영상에서 maximum intensity projection image를 이용하여 진단이 가능할 경우도 있다. 조영제 농도가 낮으면 혈관의 축상단면 영상에서 경화반을 혈관 내부나 주위 조직과 구별하기 어렵다. 한편 최근에 사용되고 있는

요드 함유량이 높은 조영제(370 ~ 400mg I/L)는 조영된 혈액과 비교적 낮은 농도의 경화반 석회가 구별이 되지 않을 가능성도 있다.

최근에 개발된 이중 에너지 기법은 석회와 요드 조영제 사이의 구별을 쉽게 하는 것으로 알려져 있다. 80kVp와 120kVp의 두 가지 에너지로 석회와 요드 조영제 표본을 스캔하였을 때 각 부분의 에너지에 따른 감쇠 계수가 다르기 때문에 동일한 표본을 두 에너지로 스캔한 후에 감산하면 석회의 팽창효과를 억제한 영상을 얻을 수 있다. 이 방법은 경동맥이나 대동맥, 하지 동맥에서 연구가 이루어지고 있으며 특히 석회화된 하지동맥의 협착 정도 평가에 유용할 것으로 기대된다. 그러나 관동맥의 움직임으로 인한 제한 때문에 이중 에너지 기법이 관동맥 석회화 병변의 협착 평가에 이용될 가능성은 미지수이다.

의미있는 협착병변에 대한 CTA의 진단 정확도

20명 이상의 대상군에 대하여 연구되었고 진단 예민도, 특이도를 계산할 수 있는 15 연구에 대한 메타 분석(18)에 의하면 대상 환자 630명의 직경 1.5 ~ 2mm 이상 혈관의 50% 이상 협착에 대한 4-절편과 16-절편 MDCT의 환자 기준 예민도는 89%였고 16-절편 MDCT가 91%로 4-절편 CT에 비해 예민도가 높았다. 근위부 혈관에 대한 진단 예민도는 75 ~ 100%였다. Garcia 등(19)의 다기관연구에 의하면 238명의 2mm 이상 혈관에 대한 16-절편 MDCT의 50% 이상 협착에 대한 환자 기준 예민도, 특이도는 98%, 54%였고, 분절 기준 예민도, 특이도는 89%, 65%였다. 같은 연구의 70% 협착에 대한 환자 기준 예민도, 특이도는 94%, 51%였고, 분절 기준 예민도, 특이도는 94%, 67%였다. 이 연구에서는 71%의 분절만이 분석 가능하였고 위양성이 많다는 것이 지적되었다.

64-절편 CTA는 50% 이상의 협착에 대한 환자 기준 예민도, 특이도가 86 ~ 99%, 79 ~ 96%로 보고되었다(13, 20 ~ 28). 모든 혈관 분절에 대해서 분석된 연구들이라는 점이 16-절편 CTA와 구별되고 최대 12%의 분절만이 평가에서 제외되어 16-절편 CT보다 개선되었다. Raff 등(20)은 64-

절편 CTA의 진단 정확도를 낮추는 원인으로 400 이상의 석회수치, 체질량지수 30kg/m^2 이상, 심박수 70회 이상 등을 들었다. 특히 Agatston 지수 400 이상의 환자군에서 진단 특이도가 67%로 감소하였다.

이중 선원 CT(dual-source CT)는 두 개의 X-선관에서 동시에 주사하여 시간해상도가 83msec로 개선된 장비이다. 이러한 개선된 시간해상도로 인해 심장의 움직임에 의한 인공물이 적어 영상의 질이 현저히 향상될 것을 기대할 수 있다. 아직 출간된 연구 결과가 많지 않으나 Scheffel 등(29)에 의하면 30명의 관동맥 질환이 의심되는 대상군에서 직경 1.5mm 이상의 혈관 분절에 대해 이중 선원 CT로 평가하였을 때 1.4% 분절이 평가 불가능하였고 이 환자들의 심박수는 각각 72, 77, 86회였으며 석회수치는 30, 616, 0이었다. 위양성 결과의 원인은 주로 심한 석회와 운동성 인공물이었다. 50% 이상의 협착에 대한 환자 기준의 진단 예민도, 특이도는 93.3%, 100%였고, 분절 기준의 진단 예민도, 특이도는 96.4%, 97.5%였다. 진단 정확도는 64-절편 CTA 결과와 유사하나 평균 석회수치가 800 이상으로 높고 베타 차단제를 사용하지 않은 상태에서 시행된 연구라는 점이 독특하다.

관동맥 MRA와 CTA

관동맥 MR 혈관조영술(MR Angiography, MRA)은 전체 심장을 포함하여 횡경막의 움직임이 적은 시기에 신호를 얻는 기법이 개발되어 사용됨에 따라 임상적용의 가능성을 시사하고 있다. Sakuma 등(30)에 의하면 131명 환자의 직경 2mm 이상 혈관의 50% 이상 협착에 대한 MRA의 환자 기준 예민도, 특이도는 82%, 90%였고, 분절 기준 예민도, 특이도는 78%, 96%였다. 심박수 70회 이상인 군과 이하인 군의 영상의 품질에 차이가 없었으며 86%의 환자에서 검사가 성공적으로 수행되었다. 이 연구에서 검사 소요시간이 평균 12.9 ± 4.3 분으로 길다는 것은 MRA의 단점으로 보이거나 CTA와 유사한 3차원 영상을 제시하고 CTA에 근사한 진단 정확도를 보고한 것은 MRA의 놀라운 발전으로 간주된다. MRA의 가장 큰 장점은 방사선 피폭이 없다는 점이며 해

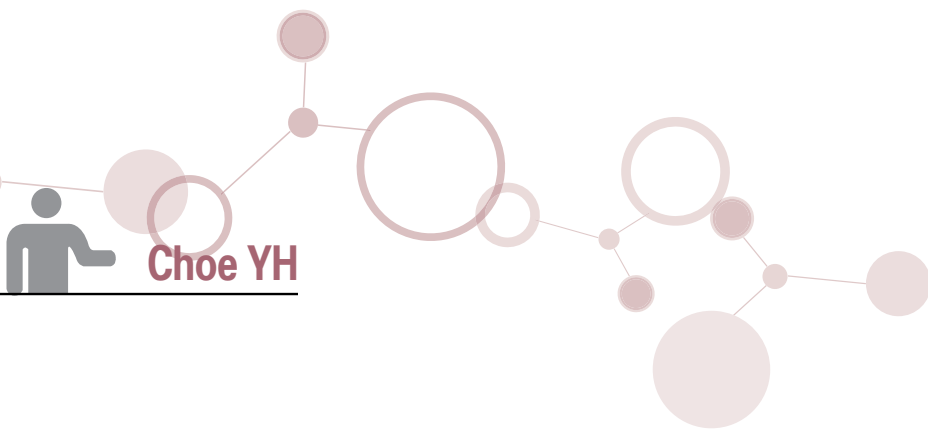
상도나 진단 정확도에서 CTA에 비해 낮다는 것, 비용이 비싸다는 것이 단점이다. 장치 3.0 T MRI를 이용한 고해상도 MRA가 실용화되면 해상도와 대조도가 개선될 것으로 전망하며 특히 석회 수치가 높은 환자군에서 MRA의 역할이 클 것으로 보인다.

결 론

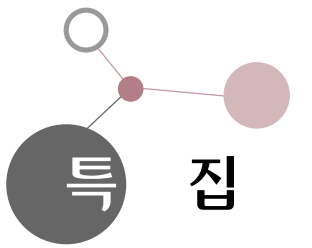
최근에 활용되는 64-절편 CT는 16-절편 CT에 비해 모든 관동맥 분절에 대해 개선된 진단 능력을 제시한다. 특히 베타 차단제의 사용으로 심박수를 조절하면 대부분의 환자에서 진단적 영상을 얻을 수 있고 증상이 있는 환자의 주요 혈관의 협착 발견과 협착 정도 평가에 64-절편 CT가 유익하다. 다만 원위부 혈관이나 변연 분지의 협착 발견, 석회가 심한 병변의 협착 정도 평가에 어려움이 있다. 협착 정도의 정량화에는 여전히 기술적 한계가 있으나 자동화 소프트웨어의 발달과 CT 해상도의 향상에 의해 장치 개선될 것으로 보인다. 최근에 개발된 128-절편 이중 선원 CT나 개발 중인 256-절편 CT에 의해 심장 운동에 의한 CTA의 한계가 대부분의 환자에서 극복될 것으로 전망된다.

참고문헌

1. Naghavi M, Libby P, Falk E, Casscells SW, Litovsky S, Willerson JT, et al. From vulnerable plaque to vulnerable patient: a call for new definitions and risk assessment strategies: Part I. Circulation 2003;108:1664-1672.
2. Choe YH. Noninvasive imaging of atherosclerotic plaques using MRI and CT. Korean Circulation J 2005;35:5-18.
3. 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.
4. Nikolaou K, Becker CR, Muders M, Babaryka G, Scheidler J, Flohr T, Loehrs U, Reiser MF, Fayad ZA. Multidetector-row computed tomography and magnetic resonance imaging of atherosclerotic lesions in human ex vivo coronary arteries. Atherosclerosis 2004;174:243-252.
5. Schroeder S, Kuettner A, Wojak T, Janzen J, Heuschmid M, Athanasiou T, Beck T, Burgstahler C, Herdeg C, Claussen CD, Kopp AF. Non-invasive evaluation of atherosclerosis with



- contrast enhanced 16 slice spiral computed tomography: results of ex vivo investigations. *Heart* 2004;90:1471-1475.
6. 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.
 7. 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 coronary plaques with multislice computed tomography. *J Am Coll Cardiol* 2001;37:1430-1435.
 8. Kopp AF, Schroeder S, Baumbach A, Kuettner A, Georg C, Ohnesorge B, Heuschmid M, Kuzo R, Claussen CD. Non-invasive characterisation of coronary lesion morphology and composition by multislice CT: first results in comparison with intracoronary ultrasound. *Eur Radiol* 2001;11:1607-1611.
 9. Leber AW, Knez A, Becker A, Becker C, von Ziegler F, Nikolaou K, Rist C, Reiser MF, White C, Steiheck 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.
 10. Hoffmann U, Moselewski F, Nieman K, Jang I-K, 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.
 11. Leschka S, Wildermuth S, Boehm T, Desbiolles L, Husmann L, Plass A, Koepfli P, Schepis T, Marincek B, Kaufmann PA, Alkadhi H. Noninvasive Coronary Angiography with 64-Section CT: Effect of average heart rate and heart rate variability on image quality. *Radiology* 2006;241:378-385.
 12. Cury RC, Pomerantsev EV, Ferencik M, Hoffmann U, Nieman K, Meselewski F, Abbara S, Jang I-K, Brady TJ, Achenbach S. Comparison of the degree of coronary stenosis by multidetector computed tomography versus by quantitative coronary angiography. *Am J Cardiol* 2005;96:784-787.
 13. 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 nonobstructive 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.
 14. Caussin C, Larchez C, Ghostine S, Pesenti-Rossi D, Daoud B, Habis M, Sigal-Cinqualbre A, Perrier E, Angel CY, Lancelin B, Paul JF. Comparison of coronary minimal lumen area quantification by sixty-four-slice computed tomography versus intravascular ultrasound for intermediate stenosis. *Am J Cardiol* 2006;98:871-876.
 15. Busch S, Johnson TR, Nikolaou K, von Ziegler F, Knez A, Reiser MF, Becker CR. Visual and automatic grading of coronary artery stenoses with 64-slice CT angiography in reference to invasive angiography. *Eur Radiol* 2006 Dec;16: [Epub ahead of print]
 16. Khan MF, Wesarg S, Gurung J, Dogan S, Maataoui A, Brehmer B, Herzog C, Ackermann H, Assmus B, Vogl TJ. Facilitating coronary artery evaluation in MDCT using a 3D automatic vessel segmentation tool. *Eur Radiol* 2006;16:1789-1795.
 17. Marquering HA, Dijkstra J, de Koning PJH, Stoel BC, Reiber JHC. Towards quantitative analysis of coronary CTA. *Int J Cardiovasc Imaging* 2005;21:73-84.
 18. van der Zaag-Loonen HJ, Dijkers R, De Bock GH, Oudkerk M. The clinical value of a negative multi-detector computed tomographic angiography in patients with suspected coronary disease: a meta analysis. *Eur Radiol* 2006;16:2748-2756.
 19. Garcia MJ, Lessick J, Hoffmann MHK; CATSCAN Study Investigators. Accuracy of 16-row multidetector computed tomography for the assessment of coronary artery stenosis. *JAMA* 2006;296:403-411.
 20. 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.
 21. Ghostine S, Caussin C, Daoud B, Habis M, Perrier E, Pesenti-Rossi D, Sigal-Cinqualbre A, Angel CY, Lancelin B, Capderou A, Paul JF. Non-invasive detection of coronary artery disease in patients with left bundle branch block using 64-slice computed tomography. *J Am Coll Cardiol* 2006;48:1929-1934.
 22. Nikolaou K, Knez A, Rist C, Wintersperger BJ, Leber A, Johnson T, Reiser MF, Becker CR. Accuracy of 64-MDCT in the diagnosis of ischemic heart disease. *Am J Roentgenol* 2006;187:111-117.
 23. Ehara M, Surmely J-F, 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. *Circulation J* 2006;70:564-571.
 24. 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 disease. *Am J Cardiol* 2006;97:173-174.
 25. 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.
 26. Mollet NR, Cademartiri F, van Mieghem CA, Runza G, Mc-



- Fadden 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.
27. 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.
28. Ropers D, Rixe J, Anders K, Kuttner A, Baum U, Bautz W, Daniel WG, Achenbach S. Usefulness of multidetector row computed tomography with 64- \times 0.6-mm collimation and 330-ms rotation for the noninvasive detection of significant coronary artery stenoses. *Am J Cardiol* 2006;97:343-348.
29. 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.
30. Sakuma H, Ichikawa Y, Chino S, Hirano T, Makino K, Takeda K. Detection of coronary artery stenosis with whole-heart coronary magnetic resonance angiography. *J Am Coll Cardiol* 2006; 48:1946-1950.



Peer Reviewer Commentary

최 규 옥 (연세의대 영상의학과)

말초혈관 조영술이 CTA 혹은 MRA로 대체된 지 오래 되었으나, 유독 관상동맥만이 심장 박동, 작은 크기, 구불구불한 경로 등의 원인으로 마지막까지 도자 삽입에 의한 혈관 조영술을 필요로 한 분야였다. 최근 수 년전부터 CT의 급격한 기술적 발달로 인하여 관상동맥 조영술도 비침습적 검사가 시도되고 있으며, 특히 관동맥우회로술후의 patency 추적은 이미 정확도가 검증되었다. native 관동맥의 경우 CT 기기의 향후 발전에 힘입어 그 정확도가 매우 개선될 것으로 예상되고 있다. 한국에서도 허혈성 심질환이 증가 일로에 있고, 그 원인인 동맥경화증이 예방, 치료 가능한 질병인 점에서 허혈성 심질환을 안전한 방법으로 조기에 검출하는 것은 매우 중요하다. 이 논문은 임상의로 하여금 본 질환의 검사방법을 소개하고, 이용방법과 한계를 기술하고, 향후 CT 기기의 발전과 이에 따른 정확도의 향상을 소개하고 있어서 매우 적절한 시기의 review article이다.