대한방사선의학회지 1999;41:265-273

전자선 단층촬영을 이용한 3차원 관상동맥 영상의 정확도[1]

김 호 석·이 향 미·최 병 욱·최 규 옥

목적 : 전자선 단층 촬영을 이용한 관상동맥 조영상을 고식적 관상동맥 조영상과 비교하여, 주요 관상동맥의 근위부 협착을 평가하는데 있어서 진단적 정확도를 구하고자 하였다.
대상 및 방법 : 관상동맥 수술의 과거력이 없는 20명을 대상으로 전자선 단층 촬영기(Imatron C-150, EBT)를 이용하여 관상동맥 조영상을 얻어서 이를 3차원 관상동맥 재구성 영상으로 만들었다. 전자선 단층촬영 관상동맥 조영상은 조영제 주입 후, 심주기 80 % R-R interval에서 호흡 정지한 상태로 폐동맥간부터 아래로 40 개의 단면 영상을 얻었다. 고식적 관상동맥 조영술을 30일(평균9일) 이내에 시행하여 그 결과를 비교 분석하였다. 근위부 관상동맥을 7 개의 분절로 나누어 비교하였으며, 내강이 50% 이상 좁아진 경우를 협착으로 정의하였다.
결과 : 20명의 환자 중 고식적 관상동맥 조영 상에서 한 분절 이상 유의한 협착이 있었던 환자는 12명이었다. 3차원 전자선 단층 촬영 관상동맥 영상에서 협착은 16명에서 발견되었다. 관상동맥을 분절별로 비교하여 보았을 때 전자선 단층 촬영을 이용한 3차원 관상동맥 영상은 좌전하행 관상동맥, 좌회선 관상동맥, 우 관상동맥의 근위부에서 높은 민감도와 특이도를 보인 반면 좌회선 관상동맥과 우 관상동맥의 중간부에서는 낮은 민감도를 보였으며, 좌주 관상동맥은 50 %의 민감도를 보였다. 3 차원 관상동맥 영상의 관상동맥 협착에 대한 전체 예민도, 특이도, 정확도, 양성 예측도, 음성 예측도는 각각 79%, 95%, 93%, 71%, 97% 였다.
결론 : 전자선 단층 촬영을 이용한 3 차원 관상동맥 영상은 비침습적인 방법으로 관상동맥의 근위부 협착의 진단에서 높은 정확도를 보이며 특히 특이도와 음성 예측도가 높아, 특정한 환자군에서 허혈성 심질환의 가능성을 배제하는데 있어 임상적으로 유용할 것으로 생각된다.

관상동맥 질환은 최근 우리나라에서도 그 발병이 증가하는 추세로 질환의 조기 진단과 치료가 환자의 예후에 매우 큰 영향을 미치고 있다. 지금까지 관상동맥 질환의 진단에는 관상동맥 조영술, 탈륨 심근 스캔, 동위원소 심실 조영술, 심초음파 등이 사용되어 왔다. 고식적을 이용한 관상동맥 조영술은 높은 공간해상도에 의하여 정확한 진단 방법으로 인정되고 있다. 그러나 조영술을 시행하는 약 20%의 환자가 정상소견을 보이며(1), 검사 자체의 위험도가 있어 사망율이 0.1%로 보고되고 있다 (2).

최근 영상 기기의 발달, 특히 디지털 감산 혈관 조영술, 컴퓨터 단층촬영 혈관 조영술, 자기공명영상 혈관 조영술, 도플러 초음파의 발달에 힘입어 거의 대부분의 혈관 질환의 진단 영상은 비침습적인 기기로 대체 되었으며 (3-5), 말초 혈관 질환의 경우 고식적은 거의 중재적 치료 시술 분야에 국한된 실정이다. 그러나 관상동맥은 폐쇄에 따른 혈류 결손의 결과가 임상 의학에서 중차대한데도 불구하고, 작은 직경, 심장 박동과 호흡에 따른 움직임, 구불구불한 경로 등의 특징으로 비침습적 혈관 조영 영역에서 가장 마지막 남은 영역이었다. 그러나 자기공명영상(6-8)이나 전자선 단층 촬영(Electron Beam Tomography, EBT)(9-11)을 이용한 관상동맥 영상이 고식적 고식적 혈관 조영상에 도전하고 있다. 자기공명영상을 이용한 관상동맥 영상은 다양한 각도의 사면(multi-angle oblique plane)을 얻을 수 있는 장점을 이용, 관상동맥의 영상을 얻을 수 있으며, velocity encoding cine MR을 이용하여 관심 혈관의 혈류속을 측정할 수 있는 점에서(12) 유리하다. 최근에는 혈관 내강 조영 증강제 (intravascular contrast agent)가 개발되어 같이 사용하기도 하며(13), 검사 시간이 차츰 단축되고 있고, 앞으로 발전 가능성이 기대되나, 아직 이에 필요한 펄스연쇄(pulse sequence)가 연구용에 거의 국한되고, 상대적으로 영상획득 시간이 길고, 심장과 혈관의 움직임, 혈류 인공산물 등 제한점이 많다. 그러나 전자선 단층촬영은 비교적 쉽게 관상동맥 영상을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 자기공명

[1]연세대학교 의과대학 진단방사선과학교실, 방사선 의과학 연구소
이 논문은 1997 & 1998년도 보건의료기술 연구 개발사업 연구비(HMPO 97- M-I-0011)의 보조로 이루어졌음.
이 논문은 1999년 4월 14일 접수하여 1999년 5월 31일에 채택되었음.

영상과 전자선 단층 촬영은 운동 혹은 약물 부하 전후의 심근관류, 국소적 및 전반적 심기능 평가(20,26)는 물론 함께 직접 비관혈적으로 관상동맥 영상을 제공함으로써 허혈성 심질환 진단에 필요한 해부학적, 병태생리학적 정보를 한번에 제공하는 통합적 심검사로 이용할 수 있는 잠재성이 있다. 이중에서도 관상동맥 영상은 허혈성 심질환에 대한 비침습적 진단의 개발에 동기를 부여하고 박차를 가하는 역할을 하고있다.

본 연구에서는 전자선 단층 촬영기를 이용한 관상동맥 영상을 고식적 관상동맥 조영상과 비교, 근위부 주요 관상동맥 협착을 평가하는데 있어서 전향적으로 진단적 정확도를 조사하였고, 위음성과 위양성 예의 원인을 후향적으로 분석하고 후향적 정확도를 구해 봄으로, 향후 전자선 단층촬영의 제한점을 이해하고 정확도를 높이며, 실제 임상 적용의 대상을 정하고자 하였다.

대상 및 방법

관상동맥 질환의 과거력이 없으며, 경피경관 혈관확장술 등 중재적 시술을 시행 받은 적이 없는 환자 중 전자선 단층 촬영 관상동맥 영상을 얻었으며, 고식적 관상동맥 조영술도 1개월(평균 9.5일) 이내에 시행한 20명을 대상으로 하였다. 이중 12명이 남자, 8명이 여자였으며, 연령은 37세에서 71세까지 평균 59세 였다.

전자선 단층 촬영은 Imatron C-150(Imatron co., South San Francisco, CA)을 이용하여 3mm 절편 두께, 2.0mm table feed, 1mm 중복하였고, EKG gating 하면서 R-R interval의 80%에서 호흡 정지한 상태로 폐동맥간부터 심저까지 아래로 약 40개의 단면 영상을 얻었다. 조영제는 4ml/sec로 총 120-160ml를 투여하였다. 조영제 주사 후 영상을 얻기 시작하기 까지의 지연 시간은 개개인의 순환 시간으로 하였고, 순환 시간은 $MgSO_4$를 정맥 주사한 후 환자가 독특한 느낌을 얻을 때 까지로 측정하였다. 얻어진 약 40 개의 영상을 해석할 때, 원천 영상과 3차원 재구성 영상을 동시에 참조 판독하였다. 3차원 영상 재구성은 AIDP up 3.0 프로그램(AccuImage Diagnostics Corporation, San Francisco, CA)을 이용하여 Shaded Surface Display 혹은 Depth Encoded Surface Image 방법으로 3 차원 관상동맥 영상을 재구성하였다. 재구성시 Hounsefield Unit(HU) 최하값을 80 이상으로 하였다. 이 프로그램의 특성상 석회화 되어 80HU 이상인 죽종은 조영 증강된 내강과 합쳐져 그 내강이 과대 평가되기 때문에 석회화된 죽종이 있을 경우는 원천 영상을 주로 참조하여 해석하였다.

관상동맥을 크게 근위부, 중간부, 원위부로 나누고, 이중 실제로 3차원 재구성 영상에서 평가가 어려웠던 원위부를 제외한 나머지 좌주 관상동맥, 좌전하행 관상동맥의 근위부와 중간부, 좌회선 관상동맥의 근위부와 중간부, 우 관상동맥의 근위부와 중간부등 총 7 분절의 결과에 대한 고식적 관상동맥 조영술 소견과 비교 평가하였다. 고식적 관상동맥 조영술 검사에서 육안적으로 50% 이상 혈관 내경이 좁아져 있는 경우를 의미있는 협착으로 정의하였다. 환자의 임상상이나 고식적 관상동맥 조영상의 정보 없이, 1명의 방사선과 전문의가 전향적으로 3차원 전자선 단층 촬영 관상동맥 영상을 해석하였다. 동일한 방사선과 전문의가 맹검으로 판독한 고식적 관상동맥 조영상 결과를 참조 기준으로 하여 전자선 단층 촬영 관상동맥 영상의 정확도를 조사하였고, 후향적으로 위양성과 위음성 예의 원인을 분석하였다.

결 과

전체 20명의 환자에서 각 환자마다 7 분절씩 총 140분절의 관상동맥을 비교하였을 때, 고식적 관상동맥 조영 상에서 한 분절 이상 유의한 협착을 보인 경우는 12명에서 19분절이었고, 전자선 단층 촬영을 이용한 3차원 관상동맥 영상에서는 16 명에서 21분절이었다. 분절 별로는 고식적 관상동맥 조영상에서 협착을 보인 경우는 좌주 관상동맥 4, 좌전하행 관상동맥 근위부 6, 좌전하행 관상동맥 중간부 6, 좌회선 관상동맥 근위부 1, 좌회선 관상동맥 중간부 0, 우 관상동맥 근위부 1, 우 관상동맥 중간부 1예 였다. 3차원 전자선 단층촬영 관상동맥 영상에서는 좌주 관상동맥 2, 좌전하행 관상동맥 근위부 6, 좌전하행 관상동맥 중간부 9, 좌회선 관상동맥 근위부 2, 좌회선 관상동맥 중간부 0, 우 관상동맥 근위부 1, 우 관상동맥 중간부 1 예를 협착으로 해석하였다.

고식적 관상동맥 조영상 결과를 참조 기준으로 하였을 때, 3차원 전자선 단층촬영 관상동맥 영상의 민감도, 특이도, 정확도, 양성예측도, 음성예측도는 79%, 95%, 93%, 71%, 97% 였다. 각 관상동맥 별, 각 분절 별 결과는 Table 1과 같았다. 분절별로는 좌전하행 관상동맥의 근위부와 중간부, 좌회선 관상동맥 근위부, 우 관상동맥 근위부는 높은 민감도와 특이도를 보인 반면, 좌회선 관상동맥 중간부와 우 관상동맥 중간부는 낮은 민감도

Table 1. Accuracy Data for Detection of Significant Stenosis (> 50 %) with Electron Beam Tomography

	Total	LM	LAD			LCx			RCA		
			p-LAD	m-LAD	subtotal	p-LCx	m-LCx	subtotal	p-RCA	m-RCA	subtotal
Sensitivity	78	50	83	100	91	100	-	100	100	0	50
Specificity	94	100	92	77	84	94	100	97	100	94	97
Accuracy	92	89	94	83	86	94	100	97	100	89	94
PPV	70	100	83	63	71	50	-	50	100	0	50
NPV	96	88	92	100	95	100	100	100	100	94	97

p- : proximal, m- : middle, LM : left main coronary artery, LAD : left anterior descending coronary artery
LCx : left circumflex coronary artery, RCA : right coronary artery, PPV : positive predictive value, NPV : negative predictive value

를 보였으며, 좌주 관상동맥은 50%의 민감도를 보였다.

위음성, 위양성 예를 각각 후향적으로 원인 분석하여 Table 2에 종합하였다. 각 원인 별로 분석하면 다음과 같다.

전자선 단층촬영의 부분 용적 효과

전자선단층촬영은 횡축 영상만을 얻을 수 있기에 관상동맥의 경로가 절편과 직각이 아닌 비스듬한 경로를 취하면 부분 용적 효과에 의한 오해석이 많이 생겼다.

호흡에 의한 오등록(misregistration)

우 관상동맥과 좌전하행 관상동맥에서 동시에 위양성을 보인 환자의 예는 후향적으로 분석해 볼 때, 호흡에 의하여 동맥이 각 절편마다 다른 자리에 찍힘으로써 3차원 영상 재구성 후 세 관상동맥이 같은 절편들에서 모두 구불구불한 경로를 보여 구별에 도움이 되었다(Fig. 1).

Table 2. Analysis of False Positive and Negative

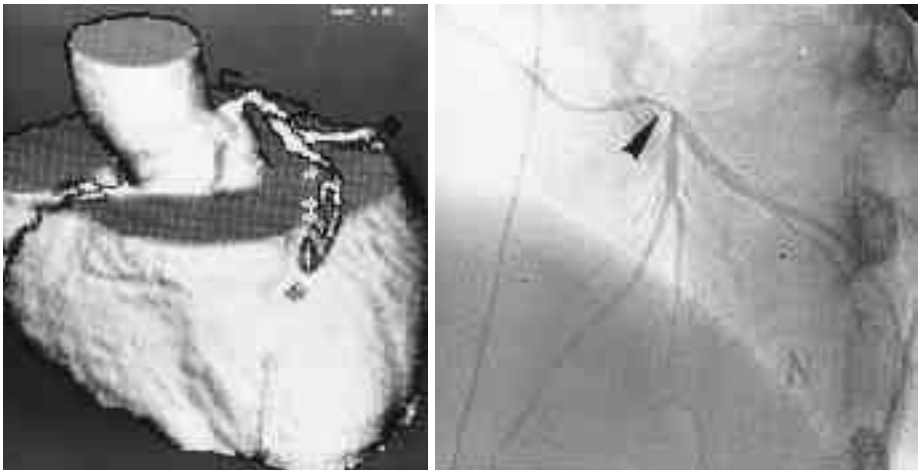
	Respiratory Misregisteration	Eccentric Atheroma	Calcification	Branching or Take off site
False Positive	2	0	0	4
False Negative	0	2	2	1

편심성 죽종

좌주 관상동맥에서 위음성을 보인 1예는 고식적 관상동맥 조영상에서 편심성 죽종에 의한 50% 협착이 있었으나, 3차원 전자선 단층촬영 재구성 영상에서는 협착이 발견되지 않았는데, 이는 심근 표면을 포함한 Shaded Surface Display 혹은 Depth Encoded Surface Image 방법으로 재구성된 3차원 영상에서는 심장으로 인하여 좌주 관상동맥을 볼 수 있는 각도에 제한을 받기 때문이었다(Fig. 2). 후향적 조사에서 심근을 제외하고 관상동맥 만으로 만든 3차원 재구성 영상에서 자유로운 각도로 좌주 관상동맥을 관찰한 결과, 편심성 죽종을 후향적으로 확인할 수 있었다. 이와 같이 좌주 관상동맥의 편심성 죽종의 경우 3차원 전자선 단층촬영 영상 재구성 각도에 따라 판독이 달라질 수 있어 여러 각도의 영상을 종합한 판독이 필요하였다.

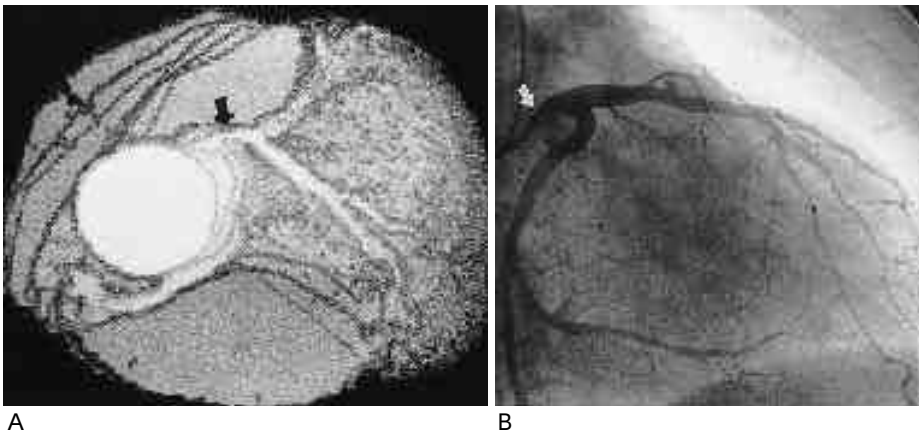
석회침착

위음성을 보인 다른 좌주 관상동맥 협착 1예는 좌주 관상동맥 원위부의 60% 협착과 좌전하행 관상동맥과 좌회선 관상동맥 기시부에 각각 90%와 50%의 협착이 같이 있었으며, 동반된 석회침착으로, 좌주 관상동맥 원위부의 짧은 협착부위를 놓치고, 좌전하행 관상동맥과 좌회선 관상동맥의 협착만으로 간과되었다(Fig. 3). 80HU 이상의 음영을 보이는 모든 pixel을



A B

Fig. 1. Respiratory mis-registration
A. Multiple stenosis at left main (LM, curved black arrow), proximal left anterior descending (LAD, white arrows) and left circumflex coronary arteries (LCx, black arrows) are seen on 3D EBT. Stenosis at the proximal LAD (single white arrow head) and LCx arteries (single black arrow) are all on the same slice. Another stenosis at the mid LAD (double white arrows), LCx (double black arrows) and proximal RCA (double open arrows) are also at the level of same slice.
B. But conventional coronary arteriography shows 90 % stenosis only at the proximal left main (arrow head).



A B

Fig . 2. Eccentric atheroma of left main coronary artery.
A. On cranial view of 3D reconstruction EBT coronary angiography, proximal left main coronary artery show 50 % stenosis (black arrow). But the lesion was not detected in frontal view angle of 3D EBT due to eccentricity of atheroma.
B. On conventional coronary arteriography, the stesosis of proximal left main coronary artery (white arrow) is definite.

포함하는 3차원 영상 재구성 방법은 석회 침착부위가 관동맥 내강처럼 보여서, 위음성 예들을 만드는 원인이었다. 전체적으로 고령의 환자 군에서는 석회 침착은 빈번히 나타났으며, 이는 고식적과 전자선 단층 촬영에서 얻은 협착의 정도를 조금씩 다르게 평가하게 하는 요인으로 작용했다. 이 문제는 원천 영상을 직접 관찰하거나, 3차원 영상에서 Depth Encoded Surface Image 방법에 의하여, 석회 침착 부위와 조영 증강된 내강을 구별하여 볼 경우, 진단에 도움이 되었다.

완전 폐쇄와 순행성, 역행성 혈류

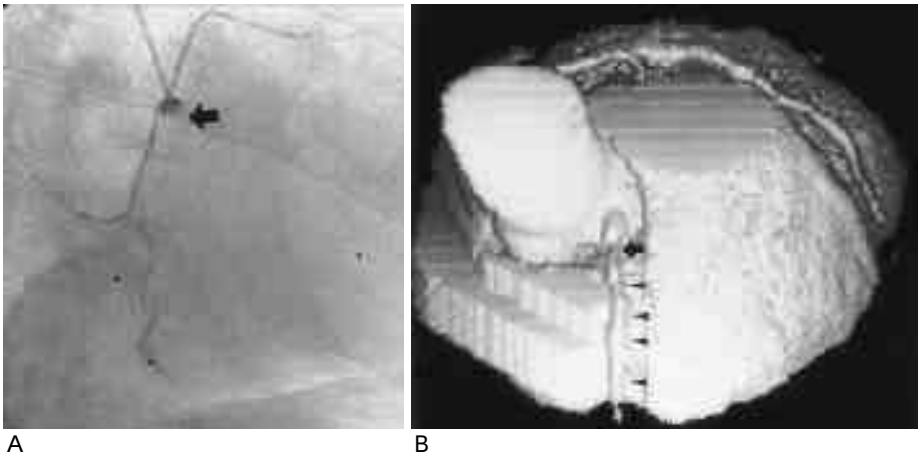
우 관상동맥에서 협착을 보인 1예는 고식적 관상동맥 조영상에서 근위부 완전 폐쇄가 있었는데, 3차원 전자선 단층촬영 영상에서는 완전 폐쇄 부위에 석회침착이 있고 이 부위의 근위부와 원위부의 내경은 정상으로 보여 국소 협착으로 잘 못 해석되었다. 이는 40회의 심박동 동안에 찍히는 전자선 단층 촬영의 기술적 조건 때문에 측부 순환에 의해 폐쇄 부위의 원위부로 부터 거꾸로 들어오는 혈류가 있을 경우 폐쇄 부위를 제외한 나머지 부분에 모두 조영제가 차게 되어 폐쇄가 국소 협착으로 보인 경우로, 전자선 단층촬영으로는 순행성과 역행성 혈류를 구별할 수 없게 되어 나타난 것이다(Fig. 4).

분지 부위

위양성과 위음성을 보인 많은 예가 주요 관상동맥이 갈라지는 기시부나 큰 분지들이 나오는 부위에서 나타났으며, 우 관상동맥에서 위음성을 보인 예는 협착이 긴 경로에서 서서히 일어나고 있고, 석회 침착이 동반되었으며, 예각 변연 동맥

A B

Fig. 3. Calcific deposit at the arterial wall.
There are 90 % stenosis at LAD and 50 % at LCx, as well as 60 % at left main coronary artery in conventional angography.
A. The density of calcific deposit merged with the density of contrast enhanced lumen of left main coronary artery (black arrow) by Shaded Surface Display reconstruction mode, and made false negative of proximal left main coronary artery stenosis. Arrow heads ; coronary sinus
B. The density of calcification (black arrows) and that of contrast enhanced lumen can be distinguished by Depth Encoded Surface Image reconstruction mode.



A B

Fig. 4. Total occlusion with distal retrograde flow via collaterals.
A. Conventional coronary arteriography reveals total occlusion of proximal RCA (black arrow), a few millimeter after its take-off. The conal and atrial branches are opacified from the patent proximal RCA.
B. 3D EBT angiogram shows a focal stenosis at proximal RCA (black arrow), as the calcific density over there was interpreted as a stenotic lumen. The middle and distal portion of the RCA (arrow heads) beyond the occlusion looks patent. This segment is filled with contrast material due to retrograde blood flow via collaterals. EBT cannot differentiate retrograde vs. antegrade flow in such case.

이 분지되는 부위여서 평가가 어려웠다(Fig. 5).

고 찰

전자선 단층 촬영은(9-11) 높은 시간 해상능이 독특한 장점이며, 높은 해상도와 EKG gating이 가능하므로 비침습적으로 관상동맥 영상을 얻는데 적합한 방법으로 알려져 있다. 또한 전자선 단층 촬영은 석회침착의 발견과 석회수치를 측정하여 고 위험군에서 관상동맥 질환을 예측하는데 사용되고 있고(14-17), 혈류 측정 방법으로 우회로 이식술 후 관상동맥의 개존성 평가에 사용되고 있으며(18-19), 좌심실의 벽운동과 심근 관류의 측정(20), 선천성 심질환의 평가(21) 등에도 사용되고 있다.

최근까지 보고된 전자선 단층 촬영을 이용한 관상동맥 영상의 결과는 Table. 3과 같다. 연구 방법은 Moshage 등(10), Reddy 등(22)과 Schmermund 등(23)은 3차원 재구성 방법을, Nakanish 등(9)은 2차원 다면 재구성방법을 사용하였다. Moshage등은(10), 전자선 단층 촬영을 이용한 관상동맥 영상은 70% 이상의 협착을 기준으로 할 때, 좌주 관상동맥과 좌전하행 관상동맥의 평가에는 유용하나, 좌회선 관상동맥과 특히 우 관상동맥의 평가에는 효율성이 떨어지는 것으로 보고하였으나 좌주 관상동맥에 협착이 있었던 예는 포함되어 있지 않았다. Nakanishi 등(9)은 다면상 재구성 방법, 주로 2차원 재구성에 의한 연구 보고를 하였으나 각 관상동맥을 분절로 나누어 비교하지는 않았다. Reddy 등(22)의 연구 보고에 의하면, 석회침착은 민감도에는 영향을 미치지 않은 반면 특이도를 떨어뜨리는 요인으로 분석하였다. Schmermund 등(23)은 주 관상동맥과 주 관상동맥에 주요 분지를 포함시킨 경우를 각각 따로 구하였는데, 이들은 위음성의 가장 큰 원인으로 석회침착을 들고 있으며, 관상동맥 내경이 작고, 방실간구의 움직임에 의해 좌회선 관상동맥과 우 관상동맥이 정확도가 떨어지는 것으로 생각하였다. 대체로 좌전하행 관상동맥의 정확도는 보고자에 따른 차이가 적으나, 우 관상동맥이나 좌회선 관상동맥의 정확도는 보고자에 따라 큰 차이가 있어서, 증례에 따른 차이가 많은 듯 하다.

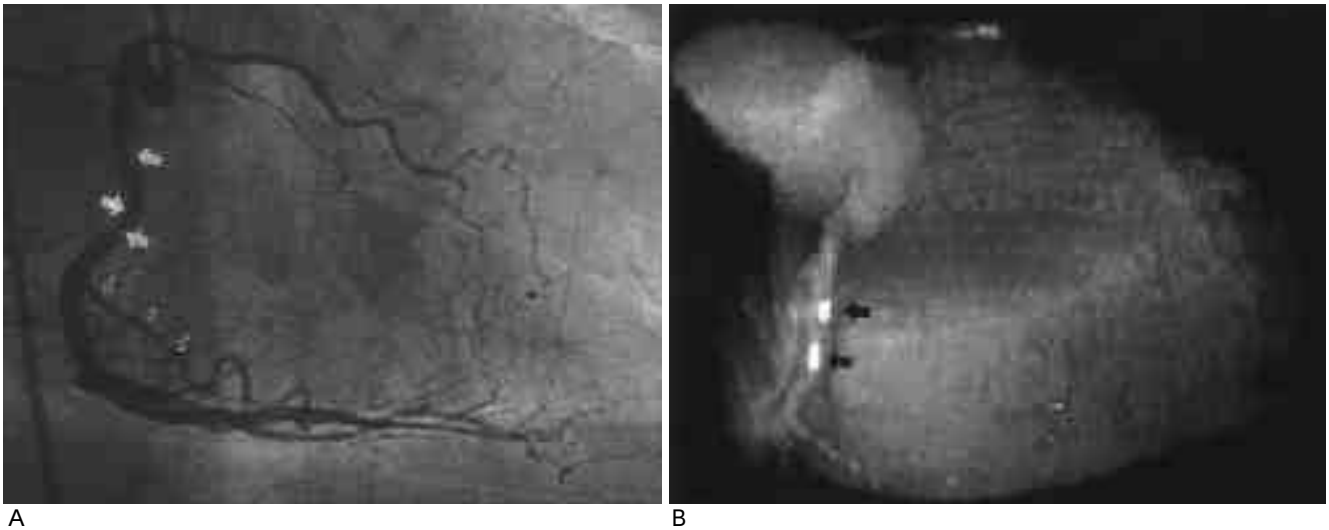
전자선 단층촬영 관상동맥영상의 제한점, 오해석에 관한 기존의 보고와 저자의 경험을 원인별로 분류하여 기술하여 보았다.

전자선단층촬영 자체의 제한점

전자선 단층 촬영을 이용한 관상동맥 영상의 원칙은 조영증강 후 같은 심주기에 횡단면을 촬영하고, 이를 직접 관찰하

Table 3. Summary of the Previous Studies

Author	Criteria of stenosis	Sensitivity/Specificity (%)				
		Overall	LM	LAD	LCx	RCA
Reddy et al.	>50%	88 / 79	- / -	93 / 63	100 / 67	67 / 77
Schmermund et al.	>50%					
12 Segments		82 / 88	- / 100	84 / 96	50 / 80	91 / 81
8 Segments		83 / 91	- / 100	82 / 98	75 / 81	90 / 83
Nakanish et al.	>50%	74 / 94	100 / 100	83 / 84	67 / 96	63 / 79



A B

Fig. 5. Stenosis at the bifurcation site.
A. Conventional coronary arteriography show multifocal stenosis (maximum 90%, white arrows) at the second portion of RCA and also 50% stenosis just after take off of the acute marginal branch (open arrows) of RCA.
B. No definite stenosis of RCA and branching site of acute marginal artery was recognized by 3D EBT. Multiple calcifications (black arrows) are noted along proximal and middle segment of RCA, masking stenosis. 3D EBT mis-diagnose the stenosis because of calcification of RCA and probable partial volume effect of the bifurcation site.

거나, 각 횡단 영상을 쌓아서 2차원 혹은 3차원 입체로 재구성하는 것이다. 전자선 단층촬영으로 얻은 자료의 촬영 조건상 3mm 절편 두께, 2mm table feed, 1mm slice overlap은 3차원 영상 재구성시 평면내(in-plane) 해상도는 좋으나, 장축 방향의 평면간(cross-plane) 해상도는 빈약한 제한점을 갖게된다. 본 프로토콜의 절편 두께가 3mm이므로 부분 용적 효과에 의하여 50-70%의 중등도 협착, 짧은 분절의 협착은 발견하지 못할 수 있다. 관상동맥 경로가 절편에 직각이 아닌 방향으로 절편면을 따라 주행하는 경우, 경로가 구불구불한 고령의 환자, 죽종이 편심성 모양인 경우들에서 3차원 재구성 영상에서는 부분용적효과에 의해 정도가 심하거나 혹은 경하게 평가되는 경우가 많았다. 또한 관상동맥이 분지되는 곳에서 작은 가지를 인식하지 못하면 급격한 협착으로 잘못 해석될 수 있었다.

전자선 단층촬영을 이용한 관상동맥 영상은 전자선 단층촬영기의 기계적 발전과 프로그램의 보완으로, 계속 향상되고 있다. 전자선 단층촬영기의 음극판이 네개 인 것을 이용하여 한번에 음극판 2개 혹은 4개로 부터 영상을 동시에 얻어 짧은 시간 안에 장축 8cm보다 더 많은 용적을 포함시키며, 절편 두께를 기존의 3mm(anisometric-voxel) 에서 1mm로 줄여 voxel을 $1\times1\times1mm^3$(isometric-voxel)로 만들어 3차원 영상 재구성시 공간적 해상도를 개선시키는 방법이 추진되고 있다.(24)

동맥 경화반의 특징

관상동맥의 죽종은 대부분이 근위부에서 생기며, 이러한 경향은 좌전하행 관상동맥에서 뚜렷하다. 그러나 우 관상동맥은 근위부 뿐만 아니라 심십자부(crux cordis) 에서 다시 한번 죽상 경화반 침착의 빈도가 증가하는 경향이 있다. 전자선 단층촬영에서는 40개 절편, 장축으로 총 8cm를 포함할 수 있어 심장축의 방향 때문에 횡격막에 가까이 위치한 우 관상동맥이 충분히 포함 되지 않는다. 이점을 보완하기 위해 저자들은 현재 환자의 상체 아래에 약 30도 경사의 쐐기 모양 틀을 받쳐 심장축에 대해 두미방향(craniocaudal) 각도를 줌으로써 전자선 단층촬영 검사 시, 우 관상동맥 원위부까지 영상에 포함시키고 있다. 위음성과 위양성의 예가 주요 관상동맥이 갈라지는 곳이나 큰 분지가 나오는 곳에 많았는데, 이는 이 부위가 상대적으로 협착의 빈도가 많은 부위기 때문에 빈도가 높고, 동시에 석회 침착이 잘 동반되는 부위이며, 전자선 단층촬영의 부분 용적 효과에 의하여 분지 부위의 정교한 구조를 보여주가 어렵기 때문으로 생각된다. 완전 폐쇄가 있고 그 원위부가 개존되어 있을 경우, 40회 동안의 심박동 동안 찍히는 전자선 단층촬영의 조건상 측부 순환에 의해 폐쇄 원위로부터 거꾸로 들어오는 역행성 혈류를 알 수는 없으며, 따라서 협착과 완전 폐쇄를 구별키는 어렵다. 동맥경화반의 석회 침착은 위음성의 가장 큰 원인으로 보고되며(23), Reddy등은 석회 침착이 민감도에는 영향을 미치지 않으나 특이도를 떨어뜨린다고 하였다(22). 이는 석회침착이 조영된 혈관 내강과 HU값이 중복되기 때문이다. 석회 침착이 있을 경우 원천 영상을 직접 관찰하거나, 3차원 영상에서 Depth Encoded Surface Image 방법에 의하여, 석회 침착 부위와 조영 증강된 내강을 구별하여 볼 경우, 진단에 도움이 되었다. 현재 이에 대한 소프트웨어의 개발이 활발하여, 미리 조영 전 영상을 얻어서 감산하는 방법을 쓰거나, 석회 침착의 감쇠수가 조영된 혈관 내강보다 높기 때문에 최저 한계치 뿐 아니라 최고 한계치도 같이 설정하여 조영 증강된 내강을 석회화된 경화반으로 부터 구별하는 방법 등이 개발되고 있다. 동맥 경화반은 흔히 편심적인 경향이 있으며, 전자선 단층촬영 조영술상 내강이 작은 대부분의 관상동맥에서 편심성 경화반은 부분 용적 효과에 의하여 구별되지 않으나, 내강이 비교적 큰 좌주 관상동맥에서는 이를 보는 투사각에 따라 위음성을 보일 수 있어서 주의를 요하였다.

심장의 해부 생리에 따른 여러 문제

저자들은 정상 한국인에 대한 전자선 단층촬영 혈관 조영술을 시행하지는 않았으나, 한국인의 관상동맥 직경은 좌주 관상동맥을 제외하면 대체로 2.0mm 이하 였다. Chernoff 등은(11) 전자선 단층촬영으로 측정한 11명의 정상인에서 관상동맥의 직경이 좌주 관상동맥 4.5+0.6mm, 좌전하행 관상동맥 3.7+0.5mm, 좌회선 관상동맥 2.9+0.6mm, 우 관상동맥 3.5+0.5mm으로 보고하여, 한국인의 관상동맥 내강이 작음을 알 수 있다. 이들은 또한, 관찰되는 관상동맥의 길이가 좌주 관상동맥 10+4mm, 좌전하행 관상동맥 65+26mm, 좌회선 관상동맥 45+20mm, 우 관상동맥 58+24mm 로 보고하였다(11). 우 관상동맥과 좌회선 관상동맥의 경우는 주변의 정맥구조, 특히 우심방귀와 관상정맥동이 관상동맥과 겹쳐 구별이 어려운 경우가 많았다. 심박동에 의한 움직임은 비록 심장의 움직임이 가장 작은 이완기인 심박 정지기, 즉 R-R interval의 80%에서 영상을 얻지만 심이완뒤의 심방수축으로 인하여 심실간구 보다 방실간구 방향의 움직임이 더 크다(23). 또한 개인간의 R-R interval 변이가 약 15%나 되기 때문에, 각 영상이 정확히 같은 심 주기에 찍히지 않는 이유로, 원천 영상에서 각 심박동에 따라 좌회선 관상동맥과 우 관상동맥의 위치가 조금씩 달라지며, 이것이 3차원 재구성 영상에서 좌회선 관상동맥과 우 관상동맥이 토막 토막 끊어져 보이는 원인이며, 이것이 다면재구성 영상에서 해석 불가능을 야기시키는 중요 원인이다(9,22). 이런 경우에는 원천 영상 소견에 더 많은 비중을 두어 해석해야 하지만, 매우 짧은 협착이 있는 경우는 이를 간과할 가능성이 있다. 한국인의 경우 서구인보다 심외막 지방층이 얇은 경우가 많은 것도 어려움의 하나였으며, 이는 특히 좌회선 관상동맥의 둔각 변연지의 경우 관상동맥의 주행부위의 지방층이 거의 없고 따라서 관상동맥이 심근과 가까워 구별하기 어려움을 경험하였다.

전자선 단층 촬영 관상동맥 조영술 프로토콜

전자선단층촬영 관상동맥 조영술은 규칙적 심박동이 필수적이며, 심방 세동 등의 심주기가 불규칙할 경우 이 검사의 적용이 되지 않는다. 심박동에 의한 움직임은 심장의 움직임이 가장 작은 이완기인 심박 정지기(diastasis)를 겨냥하여 R-R interval의 80%에서 영상을 얻지만, 실제 기계적인 제한으로 이보다 약간 늦게 찍히게 되어(25), 실제 영상에서 방실간구

움직임이 심했다고 밝혀져 R-R interval 40-65%까지 다양한 게이팅(gating) 방법이 시도되고 있다. 최근에는 본 저자들도 심주기를 R-R interval의 65%에서 촬영 시, 우관상동맥의 좀 더 좋은 영상을 얻을 수 있었으나, 좌전하행관상동맥의 경우는 75-80%가 더 좋은 영상을 얻을 수 있음을 경험하였다. 촬영 시간이 40 심박 동안으로 비교적 길기 때문에 환자의 협조가 필수적이다. 호흡 정지가 잘 되지않으면 3차원 영상이 계단식으로 층이 져서 보이는데, 이 경우에는 원천 영상을 참조하여도 평가에 어려움이 있었다. 호흡에 따른 영상의 오등록은 일반적으로 고령의 환자에서 많았으며, 환자 상태에 따라 좌우되었다. 심박수에 따라 환자의 호흡정지 시간이 결정되었는데, 심박수가 느린 경우는 호흡정지 시간이 상대적으로 길어지며, 이 경우 금기증이 없는 한 atropine 투여가 시도 되기도 한다(28). 대개 근위부를 찍는 시간은 검사 전반부이므로 평가에 어려움이 없었으나, 검사 후반부에 촬영하는 원위부의 평가는 호흡에 의한 움직임으로 해석이 불가능한 경우가 많았다. 우관상동맥의 경우 다른 관상동맥에 비해 방실간구 방향의 움직임이 클 뿐 아니라, 심장축 때문에 좌측 관상동맥 보다 횡격막쪽에 있기 때문에 검사 후반부에 찍히게 되어 호흡에 의한 영향도 더 많게 된다. 그 외에 3차원 관상동맥 영상에 영향을 미치는 요인들로는 부적절한 조영제 투여속도, 울혈성 심부전 동반시 폐순환 속도의 지연에 의한 불충분한 조영 증강 등을 생각할 수 있다. 조영제 혹은 $MgSO_4$를 이용, 순환 시간을 측정하고, 적절한 지연 시간을 구하는 것도 필수적이며, 조영제를 투여할 때 일정한 속도로 주입되도록 가능한 큰 정맥을 확보하고, 의인성 흉곽입구 폐쇄증을 초래하지 않도록 환자의 자세를 잡아주는 것이 좋은 영상을 얻는데 필수적이었다.

각 관상동맥의 정확도 차이

본 연구에서는 3차원 전자선 단층촬영 관상동맥 영상이 좌전하행 관상동맥과 좌회선 관상동맥의 평가에는 민감도가 높았으며, 좌주 관상동맥과 우 관상동맥의 민감도가 상대적으로 떨어졌고 각 분절별로는 세 관상동맥의 근위부와 좌전하행 관상동맥의 중간부는 높은 민감도를 보였으며, 좌주 관상동맥, 좌회선 관상동맥과 우 관상동맥의 중간부는 민감도가 떨어지는 것으로 나타났다. 기존의 보고에 의하면 전자선 단층촬영 관상동맥 영상은 좌주 관상동맥과 좌전하행 관상동맥에서 정확도가 높으나, 좌회선 관상동맥과 우 관상동맥의 평가에는 효율성이 떨어지는 것으로 알려져 있다(9,10,22,23). 좌주 관상동맥 협착은 임상적으로 매우 중요하며, 본 연구의 정확도가 상대적으로 낮은 이유는 영상 재구성 방법에 따라 편심성 죽종 혹은 석회침착을 찾을 수 있는 투사각을 자유자재로 바꾸기 어려웠기 때문이며, 원천 영상의 자세한 관찰 혹은 다양한 방법의 3차원 영상 재구성방법의 선택이 필요함을 알 수 있었다. 좌전하행 관상동맥은 전심실간구의 움직임이 크지 않고, 주위에 정맥도 없고, 심근 전벽 위에서 잘 보이는 것이 장점이나, 우 관상동맥이나 좌회선 관상동맥은 심이완기의 방실간구 움직임, 주위의 정맥 구조, 좌회선 관상동맥의 둔각변연지가 주행하는 좌심실 외측벽 위로의 매우 얇은 심외막 지방층 등의 이유로 해석이 어렵다. 관상동맥 경화는 근위부에 흔하나, 우관상동맥은 심실자부 주위에도 병변이 빈발하는 특징을 갖고 있으나, 심장축 때문에 그리고 전자선 단층촬영의 특징상 약 8 cm의 장축 밖에 포함 못하는 제한으로, 횡경막쪽에 있는 우관상동맥의 원위부가 포함되도록 심장 장축에 대해 적절한 각도를 주고 영상 획득 영역을 면밀히 정하는 것이 중요하였다.

허혈성 심질환에의 적용

흉통 증세, 관상동맥 예비능 검사상 전형적이지 않은 양성 등으로 고식적 관상동맥 조영술을 시행하는 환자중 30-40%가 정상소견을 보이며, 허혈성 심질환의 약 15%는 증상이 없어서, 특히 이들에 있어 비침습적인 방법의 개발이 필요하다. 본 검사는 증상이 있으나 비전형적이거나, 관상동맥 혈류 예비능 검사 소견이 양성이지만 허혈성 심질환의 특징적인 소견이지는 않은 환자들에서, 그 원인이 허혈성 심질환이 아님을 확인하기위한 예비 검사로서 유용할 것으로 생각된다. 그러나 경피적 경혈관 혈관 확장술이나 관상동맥 우회로 이식술을 시행하기 직전의 정밀한 관상동맥 평가로는 미흡하다. 한편 전자선 단층촬영은 관상동맥 석회 침착의 측정으로 관상동맥 내 동맥경화반의 총량을 알 수 있고, 이에 따라 동맥경화증 고위험군에서 향후 관상동맥 질환의 발생 확률을 예측할 수 있다(14,27). 자기공명영상과 전자선 단층촬영을 이용한 비침습적 심장 검사는 같은 진단 기기로 한번에 관상동맥 조영상, 심근 관류량 측정과 국소적 및 전반적 심실 기능도 알 수 있으며(20), 운동 혹은 약물 부하 전후의 변화를 비교할 수 있어서(26), 허혈성 심질환의 평가에 필요한 해부학적, 기능적 정보를 한번에 제공하는 통합적 심검사로 이용될 수 있는 잠재 능력을 갖고 있는 점에서 매우 획기적이다.

결론적으로, 전자선 단층 촬영을 이용한 3 차원 관상동맥 영상은 좌전하행 관상동맥에서 특히 민감도와 특이도가 높았으며, 좌주 관상동맥도 후향적으로 보면 거의 100%의 민감도와 특이도를 보여, 비침습적인 방법으로 관상동맥의 근위부 협착을 발견하는데 있어 비교적 정확하다. 따라서 증상이나 관상동맥 혈류 예비능 검사소견이 양성이지만 허혈성 심질환이 특징적이지는 않은 환자들에서 본 검사는 허혈성 심질환의 가능성을 배제하는데 있어 임상적으로 유용할 것으로 생각된다

참 고 문 헌

1. Skorton DJ, Schelbert HR, Wolf GL, Brundage BH. *Marcus Cardiac Imaging*. 2nd ed. Philadelphia : W.B.Saunders Company, 1996:241
2. Johnson LW, Lozner EC, Johnson S et al. Coronary arteriography 1984 - 1987 : A report of the registry of the Society for Cardiac Angiography and Interventions : I. Results and complications. *Cathet Cardiovasc Diagn* 1989;17:5-10
3. Fishman EK. High-resolution three-dimensional imaging form sub-second helical CT data sets: applications in vascular imaging. *AJR* 1997;169:441-443
4. Edelman RR. MR angiography: presnet and future. *AJR* 1993;161: 1-11
5. Moneta GL, Yeager RA, Antnovic R et al. Accuracy of lower extremety arterial duplex mapping. *J Vasc Surg* 1992;15:275-284

6. MacMillan RM. Magnetic resonance imaging vs. ultrafast computed tomography for cardiac diagnosis. *Int J Card Imaging* 1992 ; 8 : 217-27
7. Zhao S, Croisille P, Janier M. et al. Comparison between qualitative and quantitave wall motion analyses using dipyridamole stress breath-hold cine magnetic resonance imaging in patients with severe coronary artery stenosis. *MRI* 1997 ; 15 : 891-8
8. Muller MF, Fleisch M, Kroeker R. et al. Proximal coronary artery stenosis : three-dimensional MRI with fat saturation and navigator echo. *J Magn Reson Imaging* 1997 ; 7 : 644 - 651
9. Nakanishi T, Ito K, Imazu M. et al. Evaluation of coronary artery stenoses using electron-beam CT and multiplanar reformation. *J Comput Assist Tomogr* 1997 ; 21 : 121 -127
10. Moshage W, Achenbach S, Seese B et al. Coronary Artery Stenosis : Three-dimensional imaging with electrocardiographically triggered, contrast agent-enhanced, electron-beam CT. *Radiology* 1995 ; 196 : 707 - 714
11. Chernoff DM, Ritchie CJ, Higgins CBl. Evaluation of electron beam CT coronary angiography in healthy subjects. *AJR* 1997 ; 169 : 93 - 99
12. Higgins CB, Holt W, Pflugfelder P, Sechtem U. Functional evaluation of the heart with magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med* 1988;6:121-139
13. Schwickert HC, Roberts TP, Muhler A, et al. Angiographic properties of Gd-DTPA-24-cascade-polymer-a new macromolecular MR contrast agent. *Eur J Radiol* 1995;20:144-150
14. 최규옥. 관동맥석회치검사의역할 : 폐쇄성관동맥질환의예방및 조기발견. *순환기* 1997 ; 27 : 566 - 577
15. Fusman B, Wolfkiel CJ. Ultrafast computed tomography for detection of coronary artery calcification. *Am J Card Imaging* 1995 ; 9 : 206 -212
16. Budoff MJ, Georgiou D, Brody A. et al. Ultrafast computed tomography as a diagnostic modality in the detection of coronary artery disease: a multicenter study. *Circulation* 1996 ; 93 : 898 - 904
17. Lipton MJ, Holt WW. Computed tomography for patient management in coronary artery disease. *Circulation* 1991 ; 84: 172-80
18. Stanford W, Galvin JR, Skoton DJ. et al. The evaluation of coronary graft patency : direct and indirect techniques other than coronary arteriography. *AJR* 1991 ; 156 : 15 - 22
19. Achenbach S, Moshage W, Ropers D, Nossen J, Bachmann K. Noninvasive, three- dimensional visualization of coronary artery bypass grafts by electron beam tomography. *Am J Cardiol* 1997 ; 79 : 856 - 861
20. Rumberger JA, Bell MR. Measurement of myocardial perfusion and cardiac output using intravenous injection methods by ultrafast computed tomography. *Invest Radiol* 1992 ; 27 (supppl 2) : 40 - 46
21. Chen SJ, Li YW, Wang JK, Wu MH, et al. Usefulness of electron beam computed tomography in children with heterotaxy syndrome. *Am J Cardiol* 1998 ; 81 : 188-194
22. Reddy GP, Chernoff DM, Adams JR, Higgins CB. Coronary artery stenoses : assessment with contrast-enhanced electron-beam CT and axial reconstructions. *Radiology* 1998 ; 208 : 167 - 172
23. Schmermund A, Rensing BJ, Sheedy PF, Bell MR, Rumberger JA. Intravenous electron-beam tomographic coronary angiography for segmental analysis of coronary artery stenoses. *J Am Coll Cadiol* 1998 ; 31 : 1547 - 1554
24. Boyd DP. *Technical advances in Electron Beam CT*. Advances in Electron Beam Computed Tomograhpy : international symposium 1988
25. Achenbach S. *Velocity of in-plane coronary artery motion* : *Measurement by cine-mode Electron Beam CT and implications for ECG triggering of EBCT data ests.* Advances in Electron Beam Computed Tomography : 1998 An international scientific symposium Abstract No, 26
26. Budoff MJ, Gillespie R, Georgiou D, et al. Comparison of exercise electron beam computed tomography and sestamibi in the evaluation of coronary artery disease. *Am J Cardiol* 1998;81:683-687
27. Secci A, Wong N, Tang W, Wang S, Doherty T, Detrano R. Electron beam computed tomographic coronary calcium as a predictor of coronary events: comparison of two protocols. *Circulation* 1997 ; 96 : 1122 - 9
28. Braunwald E. *Heart disease : A textbook of cardiovascular medicine*. 5th ed. Philadelphia : W.B.Saunders Company, 1997 : 245

대한방사선의학회지 1999;41:265-273

J Korean Radiol Soc 1999;41:265-273

Accuracy of Three-dimensional Coronary Arteriography by Electron-Beam Tomography[1]

Hoseok Kim, M.D., Hyang Mee Lee, M.D., Byoung Wook Choi, M.D., Kyu Ok Choe, M.D.

[1]*Department of Diagnostic Radiology, Yonsei University, College of Medicine, Research Institute of Radiological Science*

Purpose : To evaluate the diagnostic accuracy of non-invasive coronary angiography by electron beam tomography (EBT) for the depiction of coronary artery stenosis, as compared with conventional coronary angiography.

Materials and Methods : In 20 patients with no history of coronary artery disease, EBT (Imatron C-150) study was performed with EKG-gating. Forty images were obtained in each patient from the pulmonary trunk to the cardiac base at 80 % R-R interval, and data were reconstructed into a three-dimensional coronary angiography. The interval between conventional coronary arteriograpy and EBT was less than 30 (mean, 9) days. Coronary arteries were divided into seven segments, and stenosis was defined as a narrowing of the luminal diameter of the coronary artery of more than 50 %. The results of EBT and of conventional angiography were compared for diagnostic accuracy.

Results : Conventional argiography revealed significant stenosis of the coronary artery in 12 of the 20 patients, while the use of three-dimensional coronary angiography by EBT revealed this in 16. The sensitivity and specificity of EBT were relatively high in the depiction of stenosis in the proximal left anterior descending (LAD), left circumflex (LCx), and right coronary artery (RCA) and middle LAD, but low sensitivity in the middle LCx and RCA. In the left main coronary artery, sensitivity was 50 %. The sensitivity, specificity, accuracy, and positive and negative predictive values for the depiction of coronary artery stenosis with three-dimensional coronary arteriography by EBT were 79 %, 95 %, 93 %, 71 %, and 97 %, respectively.

Conclusion: Three-dimensional coronary angiography by EBT is a non-invasive diagnostic modality for the depiction of proximal epicardial coronary artery stenosis and appears to be useful for excluding the probability of ischemic heart disease in a selected patient group.

Index words : Computed tomography(CT), three-dimensional
Computed tomography(CT), electron beam
Coronary vessels, CT
Coronary vessels, stenosis or obstruction

Address reprint requests to : Kyu Ok Choe, M.D., Department of Diagnostic Radiology, Yonsei University, College of Medicine
#134, Shinchon-Dong Seodaemun-Ku, Seoul, 120-752, Republic of Korea.
Tel. 82-2-361-5837 Fax. 82-2-393-3035