



Visualization of Borderline Coronary Artery Lesions by CT Angiography and Coronary Artery Disease Reporting and Data System

관상동맥 질환 판독과 자료 체계와 CT 혈관조영술에서의 경계성 관상동맥 병변

Hyewon Park, MD¹, Yu-Whan Oh, MD¹, Ki Yeol Lee, MD²,
Hwan Seok Yong, MD², Cherry Kim, MD³, Sung Ho Hwang, MD^{1*}

¹Department of Radiology, Korea University Anam Hospital, College of Medicine, Korea University, Seoul, Korea

²Department of Radiology, Korea University Guro Hospital, College of Medicine, Korea University, Seoul, Korea

³Department of Radiology, Korea University Ansan Hospital, College of Medicine, Korea University, Ansan, Korea

Coronary artery disease (CAD) narrows vessel lumens at the sites of atherosclerosis, increasing the risk of myocardial ischemia or infarction. Early and accurate diagnosis of CAD is crucial to significantly improve prognosis and management. CT angiography (CTA) is a noninvasive imaging technique that enables assessment of vascular structure and stenosis with high resolution and contrast. Coronary CTA is useful in the diagnosis of CAD. Recently, the CAD-reporting and data system (CAD-RADS), a diagnostic classification system based on coronary CTA, has been developed to improve intervention efficacy in patients suspected of CAD. While the CAD-RAD is based on CTA, it includes borderline categories where interpreting the coronary artery status solely based on CTA findings may be challenging. This review introduces CTA findings that fall within the CAD-RADS categories that necessitate additional tests to decide to perform invasive coronary angiography and discusses appropriate management strategies.

Index terms Coronary Artery Disease; Atherosclerosis, Coronary; Coronary Stenosis; Atherosclerotic Plaque; CT Angiography

Received November 19, 2023

Revised March 1, 2024

Accepted March 20, 2024

*Corresponding author

Sung Ho Hwang, MD
Department of Radiology,
Korea University Anam Hospital,
73 Goryeodae-ro, Seoungbuk-gu,
Seoul 02841, Korea.

Tel 82-2-920-6289

Fax 82-2-929-3796

E-mail sungho77@korea.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

관상동맥 질환은 죽상동맥경화(atherosclerosis)로 인해 혈관의 내강이 좁아지면서 심장 근육으로의 혈류공급을 방해하는 심혈관 질환이다(1, 2). 이 질환은 동맥의 협착 또는 폐색을 일으켜 심장 근육에 대한 산소와 영양분의 공급을 방해하고, 결과적으로 심근경색과 같은 중대한 합병증을 초래할 수 있다(3). 병의 진행을 예방하고 때로는 심근에 영향을 미치는 협착을 개선하면 환자의 증상 및 예후를 개선할 수 있기에 관상동맥 질환은 정확한 진단과 평가가 중요한 질환이다(4, 5).

다중검출기 전산화단층촬영(multi-detector CT; 이하 MDCT)의 도입은 전산화단층촬영 혈관조영술(CT angiography; 이하 CTA)의 활용에 있어 큰 전환점이 되었다(6). MDCT를 통해 빠른 속도의 촬영과 고해상도 영상 및 3차원 영상 재구성이 가능해지면서 CTA는 혈관질환의 진단 및 평가에서 핵심적인 역할을 수행하게 되었다(7). 특히 관상동맥과 같이 작은 혈관에서도 CTA는 혈관의 복잡한 구조와 병변을 정확하고 세밀한 영상으로 구현해 낼 수 있는 수준이 되었다(8). 실제 여러 연구 결과들을 통해 CTA는 관상동맥 질환이 의심되는 환자들을 대상으로 한 관상동맥 평가에서 안전하고 효율적인 비침습적 진단방법임을 증명하였다(8, 9).

최근에는 관상동맥 질환의 진단에서 CTA를 보다 효율적으로 활용하기 위해 질환의 심각도를 객관적으로 분류하는 방식으로 관상동맥 질환과 자료 체계(coronary artery disease-reporting and data system; 이하 CAD-RADS)가 만들어졌다(1). CAD-RADS는 CTA에서 확인된 관상동맥의 협착 정도와 병변의 범위를 표준화 후 분류하고, 각 분류에 따른 임상적 의미와 추천되는 관리 전략을 제시한다(1). 이 분류체계는 의료진 간의 의사소통을 개선하고 환자들에게 보다 나은 진단과 치료를 제공하기 위한 것이다.

임상현장에서 종종 CTA 외에 추가 진단 과정이 필요한 관상동맥 질환을 볼 수 있는데 이를 경계성 관상동맥 병변(borderline coronary lesion)이라 한다(10, 11). 이들 경계성 관상동맥 병변들은 1) 약물치료와 경과 관찰을 진행할 수 있는 경우와 2) 재관류(revascularization)를 위한 침습적인 시술이 필요한 경우 모두를 포함한다. 이 때문에 CTA로 정의되는 경계성 관상동맥 병변은 역설적으로 CTA만으로는 임상적 진단과 치료 특히 침습적 관상동맥 조영술 진행 여부에 대한 결정을 내리기 어려운 선택의 갈림길이 되기도 한다. 본 종설에서는 CAD-RADS에서 정의된 분류를 기준으로 경계성 관상동맥 병변들의 CTA 소견을 소개하고, 이들에 대한 진단 및 치료 전략에 대해 알아보려고 한다.

관상동맥 CTA

여러 임상연구들은 관상동맥 질환 의심 환자에서 관상동맥 CTA의 해석과 임상적 의미가 자리잡을 수 있도록 해주었다. 이 과정에서 2021년 미국심장학회를 포함한 국제학술단체들이 관상동맥 질환 의심 환자의 진단을 주제로 한 진료지침을 공동으로 제작하여 발표하였다(3). 이 지침에서 안정형 협심증(stable angina) 뿐 아니라 급성 흉통을 호소하는 환자들의 진단 과정에서 관상동맥 CTA 사용을 추천하고 있다(3). 그 이유는 다음 네 가지로 요약될 수 있다.

첫째, 관상동맥 CTA에서 혈관의 경화반(plaque)이 없는 정상 관상동맥이 확인된 환자에서 CTA

검사 이후 2년간 관상동맥 질환과 관련한 증상과 합병증이 발생한 빈도는 다른 심장검사 정상군들에 비해 유의미하게 낮았다.

둘째, 고위험군을 제외하고 흉통을 주소로 내원한 환자들을 대상으로 관상동맥 CTA는 관상동맥 질환과 무관한 환자들을 신속하게 감별해 줌으로써 진단에 소요되는 시간을 줄여준다.

셋째, 과거 비 폐쇄성 관상동맥 질환을 갖고 있던 환자에서 관상동맥 CTA는 관상동맥 질환의 유의미한 진행 여부를 평가할 수 있다.

넷째, 관상동맥 CTA에서 협착이 있는 경우 운동부하검사를 비롯해 심근허혈을 확인하기 위한 추가검사가 환자진단 과정이 필요할 수 있다.

결국 관상동맥 CTA는 관상동맥 질환 진단에 있어서 탁월한 음성예측도(negative predictive value)를 가지고 있다. 이에 더해 CTA는 관상동맥 질환의 유무와 질환의 진행을 평가하고 더 나아가 심근의 허혈 또는 경색에 대한 추가검사가 필요한 환자를 선별하는데 도움이 된다. 이는 관상동맥 질환이 의심되는 환자들에게 있어 CTA가 보다 나은 관리와 치료로 연결하는 중요한 가교가 되었음을 의미한다.

CAD-RADS: 추가검사가 필요한 관상동맥 질환

CAD-RADS는 관상동맥 CTA를 기반으로 관상동맥 질환의 심각도와 이후 환자 처치를 분류한 체계이다(1, 2). 2016년 처음 소개된 CAD-RADS는 이를 통한 관상동맥 CTA 해석이 불안정 협심증, 심근경색과 함께 사망과 같은 주요 심혈관 사건들에 대한 예측에 유용함을 보여주었다(12). 이후 2022년에 CAD-RADS는 최근의 임상 시험 결과를 고려하여 관상동맥 경화반의 범위와 심근허혈(myocardial ischemia) 같은 추가적인 요소들을 포함하여 CAD-RADS 2.0으로 개정되었다(2). 이번 개정판에 CAD-RADS 2.0 역시 이전과 같이 관상동맥 질환을 CTA에서 확인된 협착의 정도에 따라 동맥경화증이 없는 정상 소견의 CAD-RADS 0에서부터 적어도 하나의 혈관에서 전체내강이 막혀 있는 CAD-RADS 5까지 총 여섯 단계로 분류하고 있다. 추가된 내용은 관상동맥의 경화반에 대한 것으로 관상동맥 내 경화반의 범위에 따라 추가적인 하위 4단계 분류가 가능하다(Table 1).

CAD-RADS 2.0에서는 관상동맥 CTA에 더하여 침습적 관상동맥조영술 여부를 결정하기에 앞서 추가검사가 필요한 경계성 관상동맥 병변들은 CAD-RADS 3과 CAD-RADS 4에 해당된다(Figs. 1, 2).

CAD-RADS 3은 관상동맥에서 중등도(50%–69%)의 협착을 보이는 경우로 관상동맥 분획혈류 예비력(fractional flow reserve; 이하 FFR), 심근관류(myocardial perfusion) 또는 심장기능 검사들을 이용해 심근허혈의 유무를 평가해야 하는 등급이다. CAD-RADS 3에 속하는 환자들에게서 심근허혈의 증거, 치료 중에도 지속되는 가슴통증 또는 고위험 경화반의 존재가 있다는 것은 침습적 관상동맥 조영술이 바로 실행되어야 하는 합리적인 이유가 된다.

CAD-RADS 4는 CTA에서 보이는 좌관상동맥(left coronary artery)의 기시부인 좌주간동맥(left main coronary artery)의 협착 여부와 폐쇄성 병변의 범위에 따라 침습적 관상동맥 조영술을 포함한 임상적 권장 사항이 달라진다. 이 때문에 CAD-RADS 4는 A와 B로 세분화되며 CAD-RADS 4A는 단일 혈관 또는 이중 혈관에서 심각한 수준(70%–99%)의 혈관협착이 보이는 경우를 가리킨다. 이

Table 1. Grading for Coronary Artery Stenosis and Plaque Burden in CAD-RADS 2.0

Degree of Coronary Artery Stenosis		Terminology	
0%		No visible stenosis	
1%–24%		Minimal stenosis	
25%–49%		Mild stenosis	
50%–69%		Moderate stenosis	
70%–99%		Severe stenosis	
100%		Occluded	
Degree of Coronary Artery Plaque Burden	CAC Score	SIS	Visual
Mild (P1)	1–100	≤ 2	1–2 vessels with a mild amount of plaque
Moderate (P2)	101–300	3–4	1–2 vessels with a moderate amount 3 vessels with a mild amount of plaque
Severe (P3)	301–999	5–7	3 vessels with a moderate amount 1 vessel with a severe amount of plaque
Extensive (P4)	> 1000	≥ 8	2–3 vessels with a severe amount of plaque

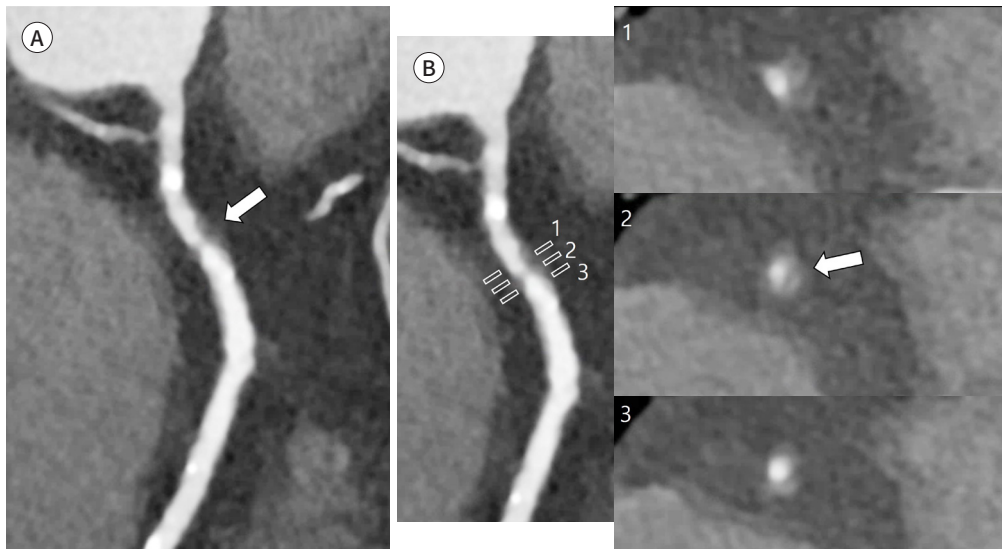
CAC = coronary artery calcium, CAD-RADS = coronary artery disease-reporting and data system, SIS = segment involvement score

Fig. 1. CAD-RADS 3 reveals moderate stenosis in a 47-year-old male with chest pain.

A. A curved multiplanar reformatted CTA image shows a vulnerable plaque (arrow) and moderate stenosis, approximately 50% in stenosis degree, in the proximal right coronary artery.

B. Transverse CTA images further illustrate the extent and characteristics of the vulnerable plaque (arrow) and stenosis in the corresponding artery segment.

CAD-RADS = coronary artery disease-reporting and data system, CTA = CT angiography



CAD-RADS 4에서는 관상동맥 FFR, 심근관류 또는 심장기능검사를 통해 심근허혈의 유무를 평가하고 심근허혈이 있는 경우 추가적으로 관상동맥의 혈류를 회복하기 위한 시술이 이루어진다(Fig. 3). CAD-RADS 4B는 좌주간동맥에서 50% 이상의 협착 또는 삼중혈관폐쇄질환(three-vessel disease)이 존재함을 의미하며 이 경우에는 바로 침습적 관상동맥 조영술과 재관류를 위한 시술을 진행하게 된다.

관상동맥 CTA와 연결 가능한 추가검사

관상동맥 CTA 촬영 범위에는 관상동맥 뿐아니라 좌심실 심근이 포함된다. 이는 CTA가 심근관류와 관상동맥 FFR로 평가대상을 확대할 수 있는 기술적 이점이다. 더욱이 전산화단층촬영(이하 CT)로 평가되는 심근관류 CT와 관상동맥 CT-FFR의 판단기준이 확립되면서 CTA는 관상동맥 질

Fig. 2. CAD-RADS 4 reveals severe stenosis in a 50-year-old male with chest pain.

A. A three-dimensional volume-rendered image of coronary CTA shows a severe stenosis (arrow) in the middle left anterior descending artery.

B. A curved multiplanar reformatted CTA image shows noncalcified plaques (arrow) and severe stenosis, approximately 70% in stenosis degree, indicating obstructive coronary artery disease.

CAD-RADS = coronary artery disease-reporting and data system, CTA = CT angiography

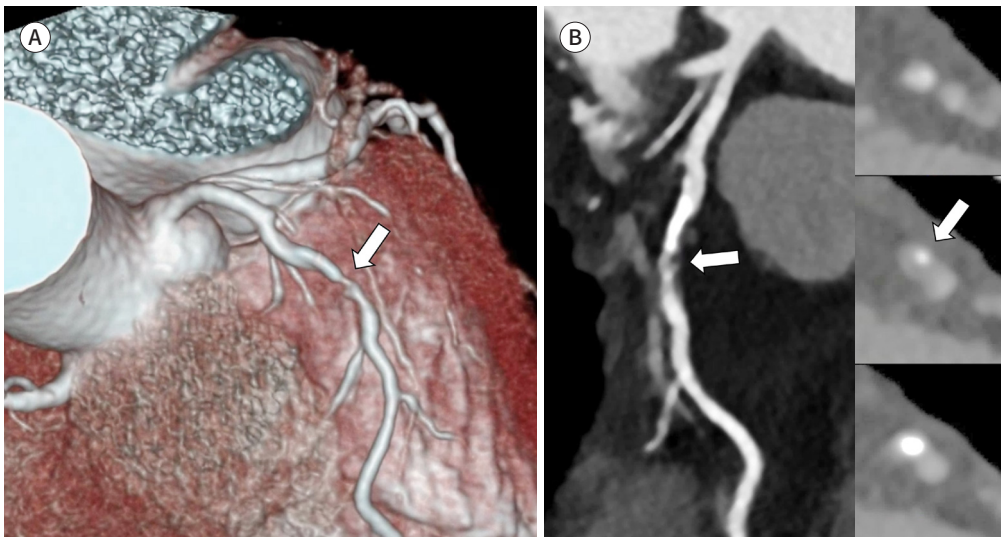
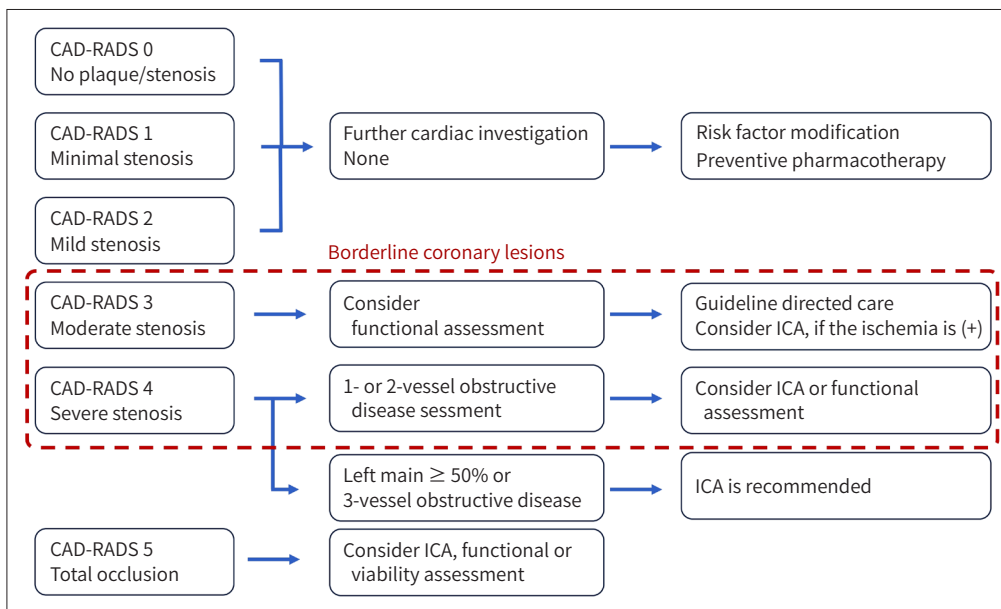


Fig. 3. CAD-RADS ver. 2.0 is used to help diagnose patients with acute chest pain.



ICA = invasive coronary angiography

Table 2. Interpretations of Coronary CT-FFR and Myocardial CT Perfusion

CT Perfusion Indication	Stress CTP	Rest CTP	Interpretation
CAD-RADS 3 and 4A	Perfusion defect (+)	Negative (-)	Myocardial ischemia in a defined coronary territory by CTA
Coronary stenosis (50%–90%) High-risk plaque	Perfusion defect (+)	Perfusion defect (+)	Myocardial infarction Myocardial ischemia in a defined coronary territory by CTA
CT-FFR Indication	CT-FFR Results		Interpretation
CAD-RADS 3 and 4A	Abnormal (≤ 0.75)		Consider invasive coronary angiography
Coronary stenosis (50%–90%)	Normal (> 0.8)		Defer invasive angiography and optimize medical therapy
High-risk plaque	Borderline (0.76–0.80)		Consider invasive angiography based on symptoms and lesion location

CAD-RADS = coronary artery disease-reporting and data system, CTA = CT angiography, CTP = CT perfusion, FFR = fractional flow reserve

환에 대한 종합적인 진단을 ‘원샷(oneshot) 검사’로 제공할 수 있는 잠재력을 가지게 되었고 CAD-RADS 2.0에도 심근관류 CT와 관상동맥 CT-FFR이 반영되었다(Table 2).

심근관류 CT (Myocardial CT Perfusion)

심근관류 CT는 휴식기와 부하기의 심근 관류 차이를 평가하여 심근허혈을 진단하는 영상 기법이다(13). 이 기법의 핵심은 심근으로의 혈류 증가를 유도하는 약제 사용과 촬영 시점을 정확하게 조절하는 것이다(14).

심근관류 CT는 심근의 혈류 증가를 유도하는 아데노신이나 디피리다몰과 같은 혈관 확장제를 주사하여 부하기를 조장 후 심근에 대한 CT 촬영을 진행한다(15). 이때 CT에서 보이는 휴식기와 부하기 심근 관류의 결손 여부를 비교해 가역성과 비가역성으로 구분한다. 일반적으로 심근 경색은 휴식기와 부하기 관류 CT 모두에서 비가역적인 혈류 감소를 보인다. 심근관류 CT의 해석과정에서 부하기와 휴식기의 CT 촬영 순서도 중요하다. 일반적으로 혈관 확장제 주사 전의 관상동맥 CTA는 휴식기 심근관류 CT의 역할을 수행한다. 이후 부하기 관류 CT를 추가하면 CTA로 관상동맥 협착정도를 확인한 후 심근허혈 유무에 대해 평가할 수 있다(13).

심근관류 CT의 촬영 방법은 크게 정적(static)과 동적(dynamic) 방식 두 가지가 있다. 정적 심근관류 CT는 조영제가 심근을 통과하는 한순간 단일 이미지를 획득하는 방법으로 심근 조영증강이 최대가 되는 시점에 CT 영상을 얻는다. 동적 심근관류 CT는 조영제가 심근을 통과하는 동안 연속적인 이미지를 얻어내는 기법으로, 한 번의 조영제 주입으로 심근의 시간-감쇄율 곡선을 계산하고 이를 바탕으로 심근의 동적인 조영증강 이미지를 생성한다. 하지만 이 동적인 심근관류 CT 촬영은 환자에 대한 방사선 노출량이 높다는 문제점을 가지고 있다(16).

심근관류 CT의 활용과 관련해 발표된 메타분석 연구 결과에 따르면 심근관류 CT는 핵의학검사보다 심근허혈에 대한 진단능력이 우수했으며 관상동맥 CTA와 함께 심근관류 CT를 함께 분석하면 재관류가 필요한 관상동맥 질환 진단에 있어서 진단의 특이도를 향상할 수 있다(17, 18). 하지만 다수의 관상동맥들에서 심한 협착이 동시에 있는 경우에는 심장 근육 전체의 혈류가 균등하게 감소되면서 심근 관류의 상대적 차이가 사라지는데 이와 같은 ‘균형관류결손(balanced perfusion defect)’ 현상은 심근관류 CT의 해석을 어렵게 할 수 있다(19).

관상동맥 CT 분획혈류예비력(CT-FFR)

기본적으로 분획혈류예비력(FFR)은 관상동맥 협착 부위의 원위부와 근위부 정상혈관의 최대 혈류량의 비율을 의미한다(20). 이를 측정하기 위해선 침습적 관상동맥 조영술을 통해 아데노신 등의 약물을 관상동맥 내로 주사하여 심장 근육의 최대충혈상태(maximal hyperemia)를 유도한 후, 압력측정 와이어를 통해 병변 원위부와 대동맥의 평균혈압의 비율을 FFR로 정의한다(21). 기본적으로 FFR은 1과 0사이 값을 가지면 이 수치가 작아질수록 심근허혈과 관련된 관상동맥 협착의 가능성이 높기에 일반적으로 FFR이 0.75 이하인 경우 심근허혈을 유발하는 유의미한 협착으로 진단한다(22).

관상동맥의 협착이 심장 근육의 혈류에 미치는 영향을 평가하기 위해 관상동맥 CTA로부터 FFR을 계산하는 방식을 CT-FFR이라 한다(23). CT-FFR 측정을 위해선 먼저 CTA 영상데이터로 만들어진 혈역학 수학적 모델을 통해 심장 근육의 최대충혈상태를 재현한다. 이후 CTA에서 구현해 내는 관상동맥의 해부학 정보와 혈역학 수학적 모델을 유체역학의 원리로 분석함으로써 관상동맥 압력을 추정하고 이들 추정 압력 값들을 통해 관상동맥의 CT-FFR을 계산해 낸다(24).

CT-FFR은 CTA의 관상동맥에 대한 해부학적 정보에 더해져 혈역학적, 기능적 평가를 추가로 제공하게 된다(25, 26). 실제 임상연구에서도 CTA로 해부학적 형태와 함께 CT-FFR을 함께 분석하는 것이 관상동맥 질환에 대한 시술의 여부를 결정하는데 도움이 되었다. 특히, 중등도의 위험성을 가진 30%–69%의 관상동맥 협착에서 최적의 치료방법을 선택하는 데 유용하다(27). 마찬가지로, 50%–70%의 협착으로 CAD-RADS 4에 해당되는 환자군에서도 CT-FFR이 진단의 정확도를 향상시켰다는 연구 보고가 있었다(28).

앞으로의 전망

향후 기술의 발달은 관상동맥 질환 진단에 있어서 CTA와 CAD-RADS 활용 가치와 방식을 더욱 발전시켜 나가갈 것으로 예상된다. 최근 CTA와 관련해 주목받고 있는 기술들은 이중에너지 CT(dual-energy CT)와 인공지능(artificial intelligence)이다(29-31).

이중에너지 CT는 CTA에서 혈관 및 조영제의 영상 품질을 개선하는 MDCT 기술 중 하나이다(32). 특정 에너지 수준의 X선에 따른 다양한 물질의 반응을 구분해 낼 수 있는 이중에너지 CT는 조영제와 조직 간의 대비를 향상시켜 영상의 품질을 개선시킨다(32). 이 때문에 이중에너지 CT에서 제공하는 CTA로 혈관 협착과 혈류의 미세한 변화를 평가하는 것이 가능하다(29). 더욱이 이중에너지 CT의 한 종류인 광자계수검출기 CT(photon-counting detector CT)는 고해상도의 이미지도 제공하기에 관상동맥 CTA에 활용범위와 대상을 확대시킬 것으로 기대된다(30).

인공지능은 컴퓨터 시스템이 인간과 유사한 지능적인 작업을 수행하도록 설계된 컴퓨터 기술이다(33). 인공지능을 이용해 다양한 데이터들의 종합적인 분석하고 데이터의 경향성을 도출해 유의미한 결론과 예측이 가능하다(33). 관상동맥 CTA의 분석과 해석에 있어서도 관상동맥의 협착정도, 경화반의 범위, 심근관류와 CT-FFR 같은 CAD-RADS에서 주목하는 주요 변수들을 인공지능을 이용해 종합적으로 분석하게 될 것이다. 이와 같은 기술의 발달을 통해 관상동맥 CTA는 지금보다도 더 손쉬우면서도 신뢰도 높은 진단이 가능한 검사로 거듭날 수 있을 것이다.

결론

관상동맥 CTA를 해석하는 CAD-RADS는 임상적으로 중요한 관상동맥 질환에 대해 적절한 진단과 치료의 방향을 효과적으로 제시한다. 관상동맥 CTA에서 보이는 관상동맥 질환들 중 혈관 협착의 심각도가 명확치 않아 침습적인 관상동맥 조영술로 바로 이어지기 어려운 경계성 관상동맥 병변에 대해 CAD-RADS는 CTA에 기반한 심근관류 CT와 CT-FFR 같은 추가적 기능평가를 추천하고 있다. 이는 최근 기술의 발전과 함께 관상동맥 질환 진단에서 관상동맥 CTA의 역할과 활용이 확대됨을 시사한다.

Author Contributions

Conceptualization, O.Y.; investigation, L.K.Y.; writing—original draft, P.H., H.S.H.; and writing—review & editing, Y.H.S., K.C.

Conflicts of Interest

The authors have no potential conflicts of interest to disclose.

ORCID iDs

Hyewon Park  <https://orcid.org/0009-0005-3109-4286>
 Yu-Whan Oh  <https://orcid.org/0000-0003-2646-0497>
 Ki Yeol Lee  <https://orcid.org/0000-0002-0323-1280>
 Hwan Seok Yong  <https://orcid.org/0000-0003-0247-8932>
 Cherry Kim  <https://orcid.org/0000-0002-3361-5496>
 Sung Ho Hwang  <https://orcid.org/0000-0003-1850-0751>

Funding

None

Acknowledgments

This research was technically supported by the Korea University Advanced Medical Imaging (AMI) Institute.

REFERENCES

1. Cury RC, Abbara S, Achenbach S, Agatston A, Berman DS, Budoff MJ, et al. CAD-RADS(TM) coronary artery disease - reporting and data system. An expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT), the American College of Radiology (ACR) and the North American Society for Cardiovascular Imaging (NASCI). Endorsed by the American College of Cardiology. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2016;10:269-281
2. Cury RC, Leipsic J, Abbara S, Achenbach S, Berman D, Bittencourt M, et al. CAD-RADS™ 2.0 - 2022 coronary artery disease-reporting and data system: an expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT), the American College of Cardiology (ACC), the American College of Radiology (ACR), and the North America Society of Cardiovascular Imaging (NASCI). *JACC Cardiovasc Imaging* 2022;15:1974-2001
3. Gulati M, Levy PD, Mukherjee D, Amsterdam E, Bhatt DL, Birtcher KK, et al. 2021 AHA/ACC/AASE/CHEST/SAEM/SCCT/SCMR guideline for the evaluation and diagnosis of chest pain: executive summary: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on clinical practice guidelines. *Circulation* 2021;144:e368-e454
4. Virani SS, Newby LK, Arnold SV, Bittner V, Brewer LC, Demeter SH, et al. 2023 AHA/ACC/ACCP/ASPC/NLA/PCNA guideline for the management of patients with chronic coronary disease: a report of the American

- Heart Association/American College of Cardiology Joint Committee on clinical practice guidelines. *Circulation* 2023;148:e9-e119
5. Byrne RA, Rossello X, Coughlan JJ, Barbato E, Berry C, Chieffo A, et al. 2023 ESC guidelines for the management of acute coronary syndromes. *Eur Heart J* 2023;44:3720-3826
 6. Lell MM, Anders K, Uder M, Klotz E, Ditt H, Vega-Higuera F, et al. New techniques in CT angiography. *Radiographics* 2006;26(Suppl 1):S45-S62
 7. Ghodasara N, Liddell R, Fishman EK, Johnson PT. High-value multidetector CT angiography of the superior mesenteric artery: what emergency medicine physicians and interventional radiologists need to know. *Radiographics* 2019;39:559-577
 8. Abdulla J, Abildstrom SZ, Gotzsche O, Christensen E, Kober L, Torp-Pedersen C. 64-multislice detector computed tomography coronary angiography as potential alternative to conventional coronary angiography: a systematic review and meta-analysis. *Eur Heart J* 2007;28:3042-3050
 9. Mowatt G, Cook JA, Hillis GS, Walker S, Fraser C, Jia X, et al. 64-slice computed tomography angiography in the diagnosis and assessment of coronary artery disease: systematic review and meta-analysis. *Heart* 2008;94:1386-1393
 10. Cheng V, Gutstein A, Wolak A, Suzuki Y, Dey D, Gransar H, et al. Moving beyond binary grading of coronary arterial stenoses on coronary computed tomographic angiography: insights for the imager and referring clinician. *JACC Cardiovasc Imaging* 2008;1:460-471
 11. Matar FA, Falasiri S, Glover CB, Khaliq A, Leung CC, Mroue J, et al. When should fractional flow reserve be performed to assess the significance of borderline coronary artery lesions: derivation of a simplified scoring system. *Int J Cardiol* 2016;222:606-610
 12. Lee JW, Kim JY, Han K, Im DJ, Lee KH, Kim TH, et al. Coronary CT angiography CAD-RADS versus coronary artery calcium score in patients with acute chest pain. *Radiology* 2021;301:81-90
 13. Rossi A, Merkus D, Klotz E, Mollet N, de Feyter PJ, Krestin GP. Stress myocardial perfusion: imaging with multidetector CT. *Radiology* 2014;270:25-46
 14. Tanabe Y, Kido T, Kurata A, Uetani T, Fukuyama N, Yokoi T, et al. Optimal scan time for single-phase myocardial computed tomography perfusion to detect myocardial ischemia—derivation cohort from dynamic myocardial computed tomography perfusion—. *Circ J* 2016;80:2506-2512
 15. Nous FMA, Geisler T, Kruk MBP, Alkadhi H, Kitagawa K, Vliegenthart R, et al. Dynamic myocardial perfusion CT for the detection of hemodynamically significant coronary artery disease. *JACC Cardiovasc Imaging* 2022;15:75-87
 16. Kim SM, Kim YN, Choe YH. Adenosine-stress dynamic myocardial perfusion imaging using 128-slice dual-source CT: optimization of the CT protocol to reduce the radiation dose. *Int J Cardiovasc Imaging* 2013;29:875-884
 17. Rochitte CE, George RT, Chen MY, Arbab-Zadeh A, Dewey M, Miller JM, et al. Computed tomography angiography and perfusion to assess coronary artery stenosis causing perfusion defects by single photon emission computed tomography: the CORE320 study. *Eur Heart J* 2014;35:1120-1130
 18. Varga-Szemes A, Meinel FG, De Cecco CN, Fuller SR, Bayer RR 2nd, Schoepf UJ. CT myocardial perfusion imaging. *AJR Am J Roentgenol* 2015;204:487-497
 19. Branch KR, Busey J, Mitsumori LM, Strote J, Caldwell JH, Busch JH, et al. Diagnostic performance of resting CT myocardial perfusion in patients with possible acute coronary syndrome. *AJR Am J Roentgenol* 2013;200:W450-W457
 20. Pijls NH, De Bruyne B, Peels K, Van Der Voort PH, Bonnier HJ, Bartunek J, Koolen JJ, et al. Measurement of fractional flow reserve to assess the functional severity of coronary-artery stenoses. *N Engl J Med* 1996;334:1703-1708
 21. Pijls NH, Tanaka N, Fearon WF. Functional assessment of coronary stenoses: can we live without it? *Eur Heart J* 2013;34:1335-1344
 22. Kern MJ. Coronary physiology revisited : practical insights from the cardiac catheterization laboratory. *Circulation* 2000;101:1344-1351
 23. Koo BK, Erglis A, Doh JH, Daniels DV, Jegere S, Kim HS, et al. Diagnosis of ischemia-causing coronary stenoses by noninvasive fractional flow reserve computed from coronary computed tomographic angiograms: results from the prospective multicenter DISCOVER-FLOW (diagnosis of ischemia-causing stenoses obtained via noninvasive fractional flow reserve) study. *J Am Coll Cardiol* 2011;58:1989-1997

24. Tesche C, De Cecco CN, Albrecht MH, Duguay TM, Bayer RR 2nd, Litwin SE, et al. Coronary CT angiography-derived fractional flow reserve. *Radiology* 2017;285:17-33
25. Sand NPR, Veien KT, Nielsen SS, Nørgaard BL, Larsen P, Johansen A, et al. Prospective comparison of FFR derived from coronary CT angiography with SPECT perfusion imaging in stable coronary artery disease: the ReASSESS study. *JACC Cardiovasc Imaging* 2018;11:1640-1650
26. Lu MT, Ferencik M, Roberts RS, Lee KL, Ivanov A, Adami E, et al. Noninvasive FFR derived from coronary CT angiography: management and outcomes in the PROMISE trial. *JACC Cardiovasc Imaging* 2017;10:1350-1358
27. Nørgaard BL, Hjort J, Gaur S, Hansson N, Bøtker HE, Leipsic J, et al. Clinical use of coronary CTA-derived FFR for decision-making in stable CAD. *JACC Cardiovasc Imaging* 2017;10:541-550
28. Hamilton MCK, Charters PFP, Lyen S, Harries IB, Armstrong L, Richards GHC, et al. Computed tomography-derived fractional flow reserve (FFR_{CT}) has no additional clinical impact over the anatomical coronary artery disease - reporting and data system (CAD-RADS) in real-world elective healthcare of coronary artery disease. *Clin Radiol* 2022;77:883-890
29. Lee JY, Oh YW, Lim DS, Yu CW, Park JH, Joo HJ, et al. Relationship between coronary iodine concentration determined using spectral CT and the outcome of percutaneous coronary intervention in patients with chronic total occlusion. *Radiol Cardiothorac Imaging* 2020;2:e190203
30. Rajagopal JR, Farhadi F, Richards T, Nikpanah M, Sahbaee P, Shanbhag SM, et al. Evaluation of coronary plaques and stents with conventional and photon-counting CT: benefits of high-resolution photon-counting CT. *Radiol Cardiothorac Imaging* 2021;3:e210102
31. Griffin WF, Choi AD, Riess JS, Marques H, Chang HJ, Choi JH, et al. AI evaluation of stenosis on coronary CTA, comparison with quantitative coronary angiography and fractional flow reserve: a CREDENCE trial sub-study. *JACC Cardiovasc Imaging* 2023;16:193-205
32. Goo HW, Goo JM. Dual-energy CT: new horizon in medical imaging. *Korean J Radiol* 2017;18:555-569
33. Hong GS, Jang M, Kyung S, Cho K, Jeong J, Lee GY, et al. Overcoming the challenges in the development and implementation of artificial intelligence in radiology: a comprehensive review of solutions beyond supervised learning. *Korean J Radiol* 2023;24:1061-1080

관상동맥 질환 판독과 자료 체계와 CT 혈관조영술에서의 경계성 관상동맥 병변

박혜원¹ · 오유환¹ · 이기열² · 용환석² · 김채리³ · 황성호^{1*}

관상동맥 질환은 죽상동맥경화(atherosclerosis)로 인해 혈관의 내강이 좁아지면서 심근허혈 또는 경색까지 유발할 수 있는 질병이다. 이런 관상동맥 질환은 조기에 진단해서 치료하면 그만큼 예후가 좋기에 정확한 진단이 환자 관리에서 매우 중요하다. 전산화단층촬영 혈관조영술(CT angiography; 이하 CTA)은 높은 해상도와 대조도를 통해 혈관의 구조 및 협착 정도를 세밀하게 평가할 수 있는 비침습적 영상 진단법이다. 여러 임상시험들이 관상동맥 질환에 대한 조기 진단과 평가에 있어 관상동맥 CTA의 유용성을 보고하였다. 최근에 관상동맥 질환이 의심되는 환자들에 대한 보다 효과적인 치료를 위해 CTA에 기반한 관상동맥 질환 진단 분류 체계인 관상동맥 질환 판독과 자료 체계(coronary artery disease-reporting and data system; 이하 CAD-RADS)가 만들어졌다. 이런 CAD-RADS는 관상동맥 CTA를 기반으로 하지만 CAD-RADS는 CTA 결과만으로 관상동맥의 정확한 상태를 해석하는 것이 어려운 경계선 범주를 포함하고 있다. 본 종설은 침습적 관상동맥 조영술 진행 여부를 결정하기에 앞서 추가검사가 필요한 경계선상 CAD-RADS범주들의 CTA의 소견과 이들에 대한 대처를 논하고자 한다.

¹고려대학교 의과대학 안암병원 영상의학과,

²고려대학교 의과대학 구로병원 영상의학과,

³고려대학교 의과대학 안산병원 영상의학과