



# Using CT to Evaluate Cardiac Function

## CT를 이용한 심장 기능 검사

Jongmin Lee, MD\*

Department of Radiology, Kyungpook National University Hospital, Kyungpook National University School of Medicine, Daegu, Korea

Received November 15, 2023

Revised February 29, 2024

Accepted March 5, 2024

\*Corresponding author

Jongmin Lee, MD

Department of Radiology,  
Kyungpook National University  
Hospital, Kyungpook National  
University School of Medicine,  
130 Dongdeok-ro, Jung-gu,  
Daegu 41944, Korea.

Tel 82-53-200-5472

Fax 82-53-422-2677

E-mail jonglee@knu.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.

A comprehensive evaluation of cardiac function includes information in relation to cardiac output and systemic venous return. The heart is composed of four chambers: two atria and two ventricles, each with its own unique mechanical function. These four cardiac chambers, their valves, and the pulmonary circulation system are inter-related as they preload or afterload on each other. Cardiac dysfunction is a failure of global cardiac function, resulting in typical clinical manifestations. To investigate the underlying cause of cardiac dysfunction, a step-by-step evaluation of cardiac blood flow tracks is necessary. In this context, imaging markers showing details of the cardiac structures have an important role in assessing cardiac function. An image-based evaluation allows for investigation of function in terms of individual cardiac components. Evaluation of cardiac function using cardiac CT has recently been validated. This review aimed to discuss cardiac CT-based imaging markers for comprehensive and detailed cardiac function assessment.

**Index terms** Cardiac CT; Cardiac Function; ECG-Gating; Imaging Markers

## 서론

심장은 신진대사 관련 요소 수송을 담당하는 순환기계의 동력원으로서 인체 장기 중 물리적 운동 기능이 가장 두드러진다. 심장의 궁극적 기능은 체순환 혈류의 유지이다. 또한 폐순환을 통한 가스교환을, 간정맥을 통한 영양요소 공급을, 인체 장기들 간 내분비 호르몬의 전달을 담당한다. 이러한 심장의 포괄적 혈류순환기능은 심장의 박출량과 전신 정맥의 울혈 여부를 봄으로써 알 수 있다.

심장 내 4개의 방실(atria and ventricles)은 각자 심장박동 주기에 따른 체계화된 용적과 내강압력의 변화를 보인다. 체순환의 시작, 즉 대동맥 유동을 만드는 좌심실의 기능은 심장 방실 기능 중 가장 중요하다. 좌심실의 박출능력을 측정하기 위한 대표적 지표는 심장박출량(cardiac output)이다(1). 심장박출량은 1분 동안 누적된 좌심실 일회박출량(stroke vol-

ume)을 의미한다. 사람마다 신체의 크기와 심장 용적이 다를 수 있어 단순한 심장박출량보다 신체 크기로 표준화한 심장박출량지수(cardiac output index)가 심장수축기의 기능을 더 잘 보여준다고 한다. 그중 특히 체표면적(body surface area)으로 표준화한 심장박출량지수가 상대적으로 가장 정확하다고 보고되고 있다. 휴지기(resting state)에서 3 mL/min/m<sup>2</sup> 정도가 정상으로 인정된다(2).

심장방실의 수축 기능을 억제하게 되는 요인들로는 심근허혈, 고이산화탄소혈증, 산증(acidosis), 마취제, 진정제 등이 있다. 심장방실의 수축 기능 상승요인은 교감신경, 부신 카테콜아민, 심장수축촉진(inotropic) 약물 등이 있다(3). 이러한 환경하에서 심장의 방실 각자가 수축 기능과 이완기능을 가지며 심장의 수축기(systole)와 이완기(diastole)에서 방과 실은 상반된 기능을 보인다. 심장의 최종적 박출능력은 심장을 구성하는 4개의 방실 및 판막과 폐순환 기능을 포괄한 결과이다. 따라서 심장박출기능 이상의 경우 심장 내부의 각 단계별 기능을 분석하여 그 원인을 파악할 필요가 있다.

심장방실은 각자가 수축 및 이완기능을 가지므로 심장 내의 혈액순환의 각 단계는 서로 밀접한 영향을 미치게 된다. 즉 직전 단계의 기능을 전부하(preload), 직후 단계의 기능을 후부하(afterload)로 표현한다(1). 그러므로 심장단계별 상호작용을 분석함으로써 포괄적 심장 기능 이상의 원인을 더욱 면밀히 분석할 수 있다. 즉 전신 정맥, 우심방, 삼첨판, 우심실, 폐동맥판, 폐동맥, 폐실질, 폐정맥, 좌심방, 승모판, 좌심실, 대동맥판, 대동맥까지를 순차적으로 분석함으로써 심장 내 혈류기능을 단계별로 검사할 수 있고 인접 단계 간의 상호 영향을 파악할 수 있다.

심장의 박출능력과 방실의 단계별 수축이완기능 및 심장 내 혈류를 검사할 수 있는 대표적 영상 검사는 심초음파(echocardiography)이다. 심초음파는 심장 기능 영상검사의 표준장비로 보편화되어 있다. 심장 CT는 초기에는 비침습적 관상동맥 조영술용으로 개발되었다. CT 기술의 발전으로 1 mm 이하의 등방성(isotropic) 공간해상도를 구현하게 되어 관상동맥 CT의 임상적 유용성이 검증되고 보편화되었다. 심장 CT는 공간해상도 뿐만 아니라 시간해상도도 개선되었고 다른 영상 기법에 비해 방실 벽-내강(lumen) 대조도가 뛰어나며 심초음파의 한계인 관찰창의 제약이 존재하지 않아 심장 기능 검사에도 유용성이 인정되고 있다(4). 또한 심장 CT는 고해상도 영상을 바탕으로 우수한 조영제-조직 대조도를 보여 방실 내강의 추출(segmentation)에 유리하며 3차원적 재구성 및 정량분석에 장점을 보인다. 방사선 피폭이라는 한계로 인해 제한적으로 사용되나 후향적 심전도 동기화 CT의 경우 다방실(multi-chamber) 기능 검사가 가능한 정보를 내포하고 있으므로 분석프로그램을 통하여 우수한 기능 정보를 도출할 수 있다(1).

본 논문에서는 심장 CT를 이용하여 심장 기능분석을 할 수 있는 영상지표들에 대한 논의하고자 한다.

## 심장 CT 검사 방법

일반적 체부 CT와 다른 심장 CT의 특징은 심전도 동기화이다. 심장박동주기의 한 시점에 맞추어 영상획득하는 전향적 동기화 또는 심장박동주기 전체를 모두 영상화하는 후향적 동기화를 선

택할 수 있다. 관상동맥 영상은 조영증강시점도 중요하나 심장박동주기 내 단계(phase) 시점이 중요한 요소이다. 적절한 심박수인 경우 심실중간충만기(diastasis)가 영상획득에 충분한 시간을 보장한다. 후향적 심전도 동기화의 경우 가장 잘 보이는 심장박동 시점을 후향적으로 선택할 여지가 있다. 심전도 동기화 방법과 무관하게 관상동맥 조영술의 품질 향상을 위하여 심박동수를 65회 이하 정도로 조절하게 되며 주로 베타차단제를 검사 1시간 전에 경구 투여한다. 심장방실의 기능을 분석할 경우 이러한 베타차단제에 의한 심장박동 저하가 어떤 영향을 미칠지에 대한 의문도 있으나 적어도 좌심실의 전부하에는 유의한 변화를 주지 않는 것으로 보고되어 있다(2).

심장 CT는 등방성 화소로 공간해상도를 설정하게 되므로 영상절편간 이격이 없어 연속된 3차원 재구성이 가능하다. 단면 또는 단축(short axis) 재구성 영상에서 각 방실의 벽 경계를 추출하여 면적을 측정하고 심슨기법 또는 3차원 추출기법에 의한 방실 용적을 계산할 수 있다(5). CT는 1 mm 이하의 절편두께를 가지므로 부분용적평균(partial volume averaging)에 의한 오류를 무시할 수 있어 용적 측정의 장점을 가진다. 후향적심전도 동기화 심장 CT의 경우 심장박동주기를 10-20단계로 나누어 복수의 CT 영상을 재구성할 수 있으며 각 단계별 CT 영상에서 심장방실의 용적을 측정할 수 있다. 이 경우 각 심장방실의 단계 간 단순 용적비교를 통하여 최대 용적 등의 고전적 방실 기능 인자들을 계산할 수 있다. 또한 각 방실의 시간-용적 곡선을 도출할 수도 있다(Fig. 1).

심장방실 별 시간-용적 곡선에서의 추가 측정을 통하여 2차 기능 변수들을 도출할 수 있다. 예를 들면, 전향적으로 선정된 심장의 수축기와 이완기에서 측정된 용적비교로 계산되는 구축률(ejection fraction; 이하 EF) 보다 시간-용적곡선에서 실제 최대 및 최소 용적의 차이를 직접 측정하여 더욱 정확한 구축률을 계산할 수 있다. 이러한 2차 기능 변수 측정은 다양한 심장 기능 지표들을 추가적으로 산출할 수 있게 하며 심장 전체 및 각 단계별 기능을 분석하는데 도움이 된다. 영상분석 기술의 발달로 심장 CT 영상의 고차원적 분석이 가능해졌으며 심근내막-내강 경계면에서 얼룩추적(speckle tracking) 기법을 이용하여 포괄적 심근변형(myocardial strain)을 정량적으로 측정하기도 한다. 심초음파와 심장 MRI에 이어 심장 CT도 심근변형 수치를 측정할 수 있다(6).

심장 CT를 이용한 심장 기능 검사의 신뢰성은 임상적 유용성 범주에 도달하였다. 대규모 다기관 연구인 coronary CT angiography evaluation for clinical outcomes (CONFIRM) registry의 아류 연구에서는 관상동맥 CT 조영술에서 측정된 좌심실기능 지표들은 심혈관계 위험도 분류와 위험 환자의 확인에 추가적인 유용성을 제공한다고 보고하였다(7). Fu 등(8)은 메타분석을 통하여 심장 CT에서 측정된 우심실 기능 지표들도 심장 MRI 결과와 대등한 정확도를 보인다고 보고하였다. MRI에 비해 CT에서 측정된 우심실의 말기이완기용적, 말기수축기용적, 구축률, 일회박출량의 전반적 상관계수가 각각 0.98, 0.95, 0.98, 0.97로 계산되었다. Kara 등(9)은 CT, MRI, 심초음파 간 좌심실 기능 지표들을 비교하였다. 전반적으로 CT와 MRI는 높은 상관관계를 보였으나( $r = 0.702, p < 0.001$ ) 심초음파와 MRI는 중등도의 상관성을 보였다( $r = 0.449, p < 0.004$ ). Rigolli 등(10)은 대규모 메타 연구를 통하여 검사기법 간 좌심실 기능 지표의 평균 차이(mean difference)를 산출하였다. MRI를 기준으로 CT는 유의한 차이를 보이지 않았다(말기확장기용적 -1.16, 말기수축기용적 -0.11, 구축률 0.86, 모두  $p > 0.05$ ). 반면 2차원 심초음파의 경우 말기확장기 및 말기수축기 용적이 유의한 차이를 보였으며 구축률은 그 차이가 유의하지 않았다(각 평균 차이 -33.23, -16.20, -10.66).

**Fig. 1.** Retrospectively ECG-gated cardiac CT data processed using dedicated software (Vitrea v6.8.109.1, Vital Images, Canon Medical Systems, Otawara, Japan) to generate multi-chamber evaluations. Twenty image datasets were reconstructed during one cardiac cycle (R-R interval).

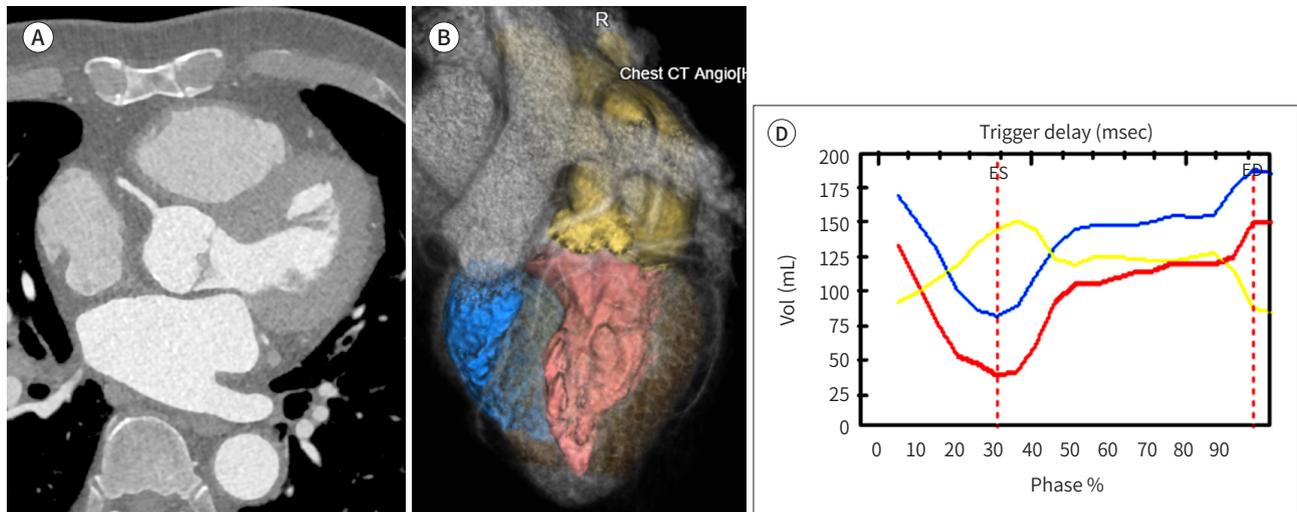
**A.** An axial plane cardiac CT image reconstructed at the mid-diastolic phase.

**B.** A semi-automatic three-dimensional segmentation of the endocardial and epicardial borders is conducted on the LV (red) and RV (blue) and the LA (yellow).

**C.** Volume-based functional parameters of the three chambers are obtained. Biventricular ejection fractions, end-diastolic and end-systolic volumes, stroke volumes, and cardiac outputs are acquired. Secondly through simple comparison  $Q_p/Q_s$  (right and left ventricular stroke volume ratio) can be generated as 0.96 in this case.

**D.** Time-volume curves for the three cardiac chambers are generated. The LV (red) and RV (blue) show decreasing volume during systole (ED to ES) and increasing volume during diastole (ES to ED). The left atrium (yellow) exhibits paradoxical motion.

BSA = body surface area, ECG = electrocardiogram, ED = end diastole, ES = end systole, LA = left atrium, LV = left ventricle, RV = right ventricle



Parameter	LV		RV		LA	
	Value	Index	Value	Index	Value	Index
Ejection fraction (%)	74		57		33	
End diastolic volume (mL)	150	83	187	104	128	71
End systolic volume (mL)	39	22	81	45	86	47
Stroke volume (mL)	111	61	106	59	42	23
Cardiac output (L/min)	5.2	2.9	5.0	2.8		

Parameter	LV		Parameter	LA	
	Value	Index		Value	Index
Myocardial mass (g)	130	1.8	Maximal volume (mL)	151	83
Myocardial volume (mL)	123		Cyclic volume change (mL)	65	36
LV/RV regurgitation fraction (%)	4.1		Reservoir volume (mL)	32	

<b>Heart rate:</b>	47 bpm
<b>BSA:</b>	1.8 m <sup>2</sup>

뿐만 아니라 심장 CT에서 자동으로 측정된 좌우심실과 좌심방의 기능 지표들도 수동측정의 결과와 유의한 차이를 보이지 않은 것으로 보고되어 있다(11). 심장 CT상의 좌심실 기능 지표들은 측정자 내 및 측정자 간의 일치도도 유의하게 높은 것으로 측정되었다. 우심실 기능 지표의 경우 불규칙한 우심실의 형태로 인해 측정자 간 일치도가 다소 낮았으나 우심실 구축률은 일치도가 높게 보고되었다(12). 이와 같이 심장 CT에서 측정된 방실 기능 지표들은 임상적 유용성이 검증되고 있다.

심장 CT에서 관상동맥 내강이나 방실 내강을 분석하기 위하여 조영증강이 필요하다. 전향적 심

전도 동기화를 시행하는 관상동맥 CT의 경우 조영제 주입량을 최소화하기 위하여 촬영 시점에 좌심실과 대동맥이 조영될 수 있을 만큼의 짧은 조영제볼루스(contrast bolus)를 주입하고 식염수로 볼루스의 후미를 밀어(flushing) 조영제의 농도를 유지한다. 이 경우 우측 방실에서는 조영제 씻김 현상이 나타날 수 있다. 반면 방실의 기능분석을 포함한 심장 CT의 경우 우측 방실의 내강 경계를 추출(segmentation) 해야 하므로 조영제볼루스에 이어 50% 정도로 희석된 조영제를 주입함으로써 우측 방실도 추출 가능한 정도로 조영하는 기법을 이용한다(4).

심장 CT의 경우 최소 피치 값으로 촬영하므로 피폭 시간이 상대적으로 긴 편이며 후향적 심전도 동기화의 경우 지속적 방사선 조사로 인하여 방사선 피폭량은 더욱 증가한다. 고전적 후향적 심전도 동기화 심장 CT의 경우 방사선 피폭량은 14.8에서 21.1 mSv까지 높게 보고되었다(4). 반면 심장 CT의 수요 증가에 맞추어 방사선 피폭량 저감을 위한 노력도 최근 10여 년간 활발하였다. 방사선발생장치의 성능개선으로 방사선 에너지 스펙트럼에서 저에너지 영역을 여과하는 기술이 도입되었으며 심장박동 단계에 맞추어 관전류를 조절함으로써 방사선 피폭량을 저감하였다(13). 또한 피검자의 방사선투과성을 기반으로 방사선 관전압을 자동으로 최적 조정함으로써 피폭량을 상당수준 저감할 수 있었다(14). 이러한 개선에 힘입어 최근의 후향적 심전도 동기화 심장 CT의 피폭량은 고전적 전향적 동기화 CT 수준으로 개선되었다. 그러나 1 mSv 이하의 최신 전향적 동기화 CT와 비교할 경우 여전히 상대적으로 피폭량이 높은 편이므로 후향적 동기화의 필요성이 인정될 경우에 한 해 사용해야 할 것이다.

## 좌심실 기능 검사 지표

좌심실은 이완기와 수축기에 용적이 증감하며 이때 변화량은 동일하다. 이완기에 대동맥판 폐쇄시점부터 승모판 개방시점 사이 짧은 기간 동안 좌심실 용적은 미세한 증가를 보이며 좌심실 내 음압이 발생하고 승모판 개방이 유도된다. 이 기간을 등용적성확장기(isovolumetric relaxation)라고 한다. 승모판의 경우 등용적성확장기 동안 축적된 좌심실 내 음압과 좌심방 내 유입된 폐정맥혈로 인한 양압의 차이가 승모판막의 항복응력(yield stress)을 넘어설 경우 개방이 시작된다. 승모판 개방시점부터 좌심실은 급격히 확장되어 좌심방 및 폐정맥으로부터 혈류가 유입되며 이 시기를 수동충만(passive filling)기라고 한다. 좌심실 충만이 진행되어 좌심실과 좌심방의 압력 차이가 없어지면 더 이상의 수동적 유동이 어려워진다. 이때 좌심방이 능동수축하고 좌심실에는 능동충만(active filling)이 발생한다. 좌심방의 능동수축 동안 혈액은 좌심실로 추가 유동을 하는 동시에 좌심실의 수용능력에 따라 일부는 폐정맥으로 역류하기도 한다. 수축기 직전 승모판 폐쇄부터 대동맥판 개방 사이 좌심실 수축으로 용적은 약간 감소하며 내강압력이 증가하는 등용적수축(isovolumetric contraction)이 발생한다. 좌심실 내강의 압력이 대동맥 내강 압력을 받고 있는 대동맥판막의 항복응력을 초과할 경우 대동맥판이 개방되고 수축기가 시작된다. 전신고혈압의 경우 등용적수축기 동안 좌심실의 수축력은 더 많이 요구될 것이다. 이어서 수축기 동안 좌심실 수축이 대동맥판 폐쇄시점까지 계속되어 전신동맥순환이 유지된다(Fig. 2A) (1).

좌심실의 확장과 수축 기능을 나타내는 지표들은 다양하다. 임상현장에서는 임상진찰과 영상검

사 및 심전도 검사 등으로부터 각기 다른 다양한 지표들을 이용하게 된다.

심장영상에서 볼 수 있는 좌심실 기능 지표 중 단순한 간접지표는 좌심실 비후(hypertrophy)이다. 장기간 수행된 최근 연구에 따르면 좌심실 비후는 프래밍햄 위험도 등의 전통적 임상적 심혈관 위험도 인자나 관상동맥 석회수치와 별도로 추가적인 심혈관 위험도 예측 능력이 있어 좌심실 및 심장의 기능을 간접적으로 잘 보여주는 지표라고 보고되었다(15).

그러나 궁극적인 좌심실 기능은 토출 능력이므로 심장박출량의 측정이 고전적이며 유용한 지표이다. 심도자술을 이용한 침습적 측정방법이 있었으나 비침습적 심장박출량 측정방법이 영상검사 도입 후 가능하게 되었다. 심장영상에서 좌심실의 최대 및 최소 용적을 측정 또는 계산하여 좌심실 일회박출량을 산출하고 심장박출량을 계산할 수 있다(Table 1) (16). 심장박출량은 좌심실의 수축 기능을 대변하긴 하나 심장 전체의 최종적 박출능력에 더 가까운 지표이다.

심장 CT에서도 고전적 심장박출량을 계산하기 용이하나 Vanhoenacker와 Van Hoe (17)는 용적 측정 없이 더욱 단순화된 방법을 제시하였다. 심장 CT 중 최대 조영증강 시간 파악을 위한 초기 검사에서 좌우심실 조영제 도달시간 차이를 측정할 수 있다. 이 시차가 좌심실 박출량과 직결된다고 보고하였으며 비정상 시차 지연(transit delay) 수치를 10.5초 이상으로 제시하였다.

좌심실 고유의 수축능력 자체를 보기 위한 유용한 지표로는 구축률이 있다. 구축률은 좌심실 최대 용적에 대한 용적 변화의 비율로서 검사에 따라 55% 정도의 경계 값을 기준으로 삼는다(Table 1) (16). 그러나 좌심실 구축률은 좌심실 전체의 최대 최소 용적 차이만을 이용한 지표이므로 좌심실

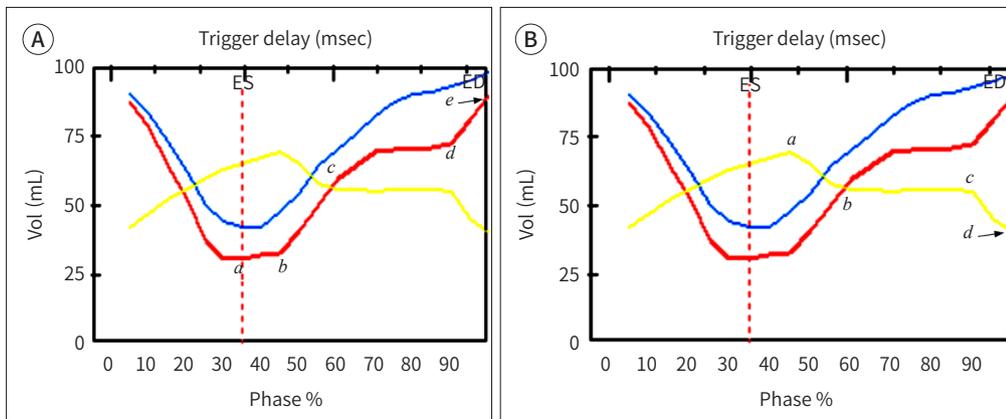
Fig. 2. Cardiac CT-based time-volume curve of the three cardiac chambers.

**A, B.** During diastole, the ventricular volume increase ( $V [e - a]$  in panel a) overwhelms the atrial volume reduction ( $V [a - d]$  in panel b), owing to imported blood volume directly from the pulmonary vein to the left ventricle during the conduit phase of the left atrium ( $T [b - c]$  in panel b) and simultaneous diastasis of the left ventricle ( $T [c - d]$  in panel a).

**A.** During diastole, the  $T (a - b)$  segment of the left ventricular curve (red) represents isovolumetric relaxation.  $T (b - d)$  represents passive filling, and  $T (d - e)$  represents active filling.  $V (e - a)$ ,  $V (d - a)$ , and  $V (e - d)$  represent stroke volume, passive filling volume, and active filling volume, respectively.  $V_e$  and  $V_a$  are the end-diastolic and end-systolic volumes of the left ventricle.

**B.** During systole, the left atrium (yellow) shows a reserve phase ( $T [d - a]$ ) by receiving blood flow from the pulmonary veins. During diastole, the left atrium empties into the left ventricle through three distinct phases.  $T (a - b)$ ,  $T (b - c)$ , and  $T (c - d)$  represent passive, conduit, and active filling phases, respectively.  $V (a - b)$  and  $V (c - d)$  represent passive and pumping flow volumes. During the conduit phase, the left atrial volume change ( $V [b - c]$ ) is not significant compared with the left ventricular volume increase in the same phase.

ED = end diastole, ES = end systole,  $T (* - *)$  = time period between  $*$ ,  $V (* - *)$  = volume change between  $*$



레벨에 따른 정상적 구축률 차이는 고려되지 않는다. 또한 좌심실의 수축가속도도 반영하지 못한 다는 단점이 있다. 또한 심장의 크기와 심근의 두께 그리고 휴지기 좌심실 박출량 및 심박수 등에 의해 단순한 고전적 좌심실 구축률은 영향을 받을 여지도 있다.

심장 CT는 3차원 용적 데이터를 심슨기법 또는 3차원 추출기법으로 측정하므로 심근 분절별 구축률을 별도로 계산할 수도 있다. 이러한 지역 구축률(regional EF)은 유의한 관상동맥 협착을 예측하는데 SPECT 검사보다 유용하다고 보고되고 있다(18). Rodrigues 등(19)은 심장 MRI에서 개인별로 다를 수 있는 심장 크기와 심근 두께를 표준화한 수정 구축률(corrected EF)을 제시하였으며 좌심실기능 정도를 재분류하게 되었다고 보고하였다. Arenja 등(20)은 심장 MRI를 이용하여 좌심실 구축률을 심근 두께로 표준화하였다. 즉 심근부피 기준 좌심실박출량 비율인 심근수축률(myocardial contraction fraction)을 제안하였으며 비허혈성 확장성심근증의 예후 예측에 높은 신뢰도를 보였다(Table 1). 또한 좌심실 종축직경의 변화율을 측정하여 종축변형(long axis strain)으로 표현하였고 좌심실 수축 기능의 평가에서 구축률보다 우월한 지표이며 예후 예측에도 독립적 가치가 있음을 주장하였다. 심초음파에서는 심근얼룩추적(myocardial speckle track-

**Table 1.** Functional Parameters and Their Normal Reference Values

Chamber	Target Action	Parameters	Function	Units	Reference Range*	Modalities	References
	Cardiac output	CO	SV X HR	L/min	3.0-6.0	CT	(15)
		PTT	TpLV - TpRV	sec	<20.5	CT	(14)
LV	Expansion	LVEDVI	LVEDV / BSA	mL/m <sup>2</sup>	M: 48-76, F: 52-47	CT	(15)
		Contraction	EF	SV / LVEDV	%	M: 55-72, F: 58-74	
		MCF	SV / LVMM × 1.0 <sup>5</sup>	%		MRI	(20)
		LAS	(LVLDdia - LVLDsys) / LVLDdia	%	14-19		
		SVI	SV / BSA	mL/m <sup>2</sup>	M: 29-49, F: 32-48	CT	(15)
		CI	CO / BSA	L/min/m <sup>2</sup>	1.9-3.0		
		LVMMI	LVMM / BSA	g/m <sup>2</sup>	M: 65-94, F: 55-73		
LA	Expansion	LAVImax	LAVmax / BSA	mL/m <sup>2</sup>	M: 48-68, F: 40-54	CT	(45, 49)
		LAVImin	LAVmin / BSA	mL/m <sup>2</sup>	M: 26-40, F: 20-36		
	Emptying	LAEF	(LAVmax-LAVmin) / LAVmax	%	> 40	CT	(31)
		LAVCI	LAEDV / LVEDV	%		MRI	(33)
RV	Expansion	RVEDVI	RVEDV / BSA	mL/m <sup>2</sup>	M: 60-100, F: 63-87	MRI	(34)
		RVESVI	RVESV / BSA	mL/m <sup>2</sup>	M: 26-52, F: 27-43		
	Contraction	RVEF	RVSV / RVEDV	%	M: 47-57, F: 46-62		
		RVSVI	RVSV / BSA	mL/m <sup>2</sup>	M: 28-54, F: 32-48		
		RVOI	RVO / BSA	L/min/m <sup>2</sup>	M: 2.0-3.8, F: 1.9-3.5		
RA	Expansion	RAVImax	RAVmax / BSA	mL/m <sup>2</sup>	M: 39-65, F: 41-68	CT	(41)
		RAVImin	RAVmin / BSA	mL/m <sup>2</sup>	M: 20-39, F: 18-39		
	Contraction	RAEF	(RAVmax - RAVmin) / RAVmax	%	M: 32-54, F: 35-61		

\*Reference range is calculated as interval between mean - SD and mean + SD.

BSA = body surface area, CI = cardiac output index, CO = cardiac output, EDVI = end-diastolic volume index, EF = ejection fraction, F = female, HR = heart rate, LA = left atrium, LAVCI = left atrioventricular coupling index, LAV = LA volume, LAVI = LA volume index, LV = left ventricle, LVEDV = LV end-diastolic volume, M = male, MCF = myocardial contraction fraction, PTT = pulmonary transit time, RV = right ventricle, RVO = RV output, SD = standard deviation, SV = stroke volume, SVI = stroke volume index, TpLV = LV peak enhancement time, TpRV = RV peak enhancement time

ing)을 통하여 측정된 각 측정 지점의 종축변형을 종합한 포괄적종축변형(global longitudinal strain; 이하 GLS)이라는 지표를 제공하고 있으며 이미 익숙한 용어이다. 반면 종축변형은 좌심실의 종축직경의 일차원적 변화율을 측정된 것으로 GLS와 혼동을 줄 수 있는 용어일 것이다. 심장 CT를 이용한 좌심실 용적 측정은 MRI에 비교할 만큼의 유용성을 인정받고 있으므로 심장 MRI에서 측정된 기능 지표들을 CT에도 적용할 수 있을 것이다(9, 10). 그러나 심장 CT의 지표들은 추가적 검증 과정을 거칠 필요가 있겠다.

심장이완기의 좌심실 확장 기능을 평가하는데 구축률과 같은 단순한 지표는 없다. 영상에서도 단순 지표는 없으나 좌심방 및 좌심실 확장이 확인될 경우 좌심실 확장 기능 이상을 간접적으로 예측할 수는 있다. 임상적으로는 복잡한 평가 기준을 통하여 좌심실 이완기 기능을 평가한다. 심초음파를 이용하여 좌심방 확장뿐만 아니라 승모판을 통한 혈류의 시간-속도 스펙트럼에서 정량 지표를 도출하고 승모판륜(mitral valve annulus)의 위치이동속도를 측정한다(21).

심장이완기 기능 이상에서 좌심방의 확장 및 승모판 수동충만혈류(passive filling flow)의 감소 시간 감소는 지속적으로 관찰된다. 좌심실 확장 기능 이상 초기에는 승모판 수동/능동 혈류 속도 비(E/A ratio) 감소(0.8 이하)가 나타나고 더 진행되면 좌심방 수축력 감소로 인해 E/A는 정상범위로 진입할 수 있으며(위정상, pseudo-normal) 승모판륜의 위치이동 속도가 감소하여 승모판 수동충만 혈류 속도/ 판륜 위치이동 속도의 비(E/E' ratio)가 증가(14 이상) 하게 된다. 이러한 역동적 변화의 이유로 좌심실의 이완기 기능 이상은 단순 지표로 측정하기 어렵다(21).

심장 CT의 경우 좌심방의 확장상태를 파악하기에는 용이하다. 반면 승모판 혈류 속도를 직접 실시간 측정할 수 없어 좌심실 이완기 기능 평가에는 한계가 있다. 그러나 심장 CT에서는 심박동 주기 단계별 좌심실 용적을 측정할 수 있으므로 단계 간 용적의 변화량을 계산하고 그 단계에서의 승모판 개구부(orifice) 면적을 나누면 해당 단계 내 승모판 경유 혈류 유동 평균 속도가 산출된다. 단계별 충만속도 중 최대 수동충만속도와 최대 능동충만속도를 비교하면 E/A를 계산할 수 있다. 또한 승모판륜의 위치이동 속도도 측정할 수 있으므로 E/E'의 계산도 가능하다. 심초음파에서는 특정 단계시점에서의 최대 혈류 속도를 이용하는 반면 CT에서는 한 단계 내 평균 속도라는 차이가 있으나 상관성은 유의한 것으로 보고되고 있다. 이로써 심장 CT도 좌심실 이완기 기능을 평가할 수 있다. 그러나 기술적 복잡성으로 인해 임상 현장에서의 활용도는 높지 않은 실정이다(22).

이러한 기술적 복잡성을 줄일 수 있는 지표도 제시되고 있는데 심장 MRI에서 좌심방 말기능동 수축에 의한 좌심실의 능동충만 정도(left ventricle bounce)를 측정하여 좌심방 수축 기능과 좌심실이완기능의 평가 지표로 제시하기도 하였다(23). 이미 심장 CT 촬영 초기 시간-농도 곡선검사에서 획득한 폐순환이동시간이 심장박출량을 반영한다고 하였다. 이에 추가적으로 Guo 등(24)은 폐순환이동시간이 좌심실 이완기 기능을 평가하는 비침습적이고 편리한 정량적 지표라고도 보고하였다. 즉 폐순환이동시간의 임계치를 11.9초로 설정할 경우 receiver operating characteristic curve (ROC)의 곡선하면적은 0.83 ( $p < 0.001$ )로서 가장 좋은 예측인자로 제시하고 있다.

변형(strain)이란 심장박동주기 동안 심근의 일차원 상 변형 정도를 상대적 비율로 표현하는 지표이다. 주로 좌심실 심근의 특정 부위를 추적하며 종축, 방사축, 회전축을 따라 이동한 정도를 측정하는 것이다. 심장초음파에서는 심근의 얼룩을 추적하여 선정된 다수의 측정점들의 변형을 종합

한 포괄적변형(global strain)을 제시한다. 이중 종축방향의 포괄적변형이 임상적으로 유용성을 인정받고 있으며 좌심실 수축 기능 평가에서는 구축률보다 민감하고 정확하며 재현성도 높다고 인정되고 있다(25). 심장 CT에서는 심근 내 추적 가능한 뚜렷한 지점을 포착하기 어렵다. 따라서 고해상 고대조를 보이는 심근내막-내강 경계면을 선정하고 특정 부위들을 추적하여 변형을 산출하기도 한다. 이 경우 심초음파 결과 및 좌심실확장 임상지표인 N-terminal pro brain natriuretic peptide (NT-proBNP)와 유의한 상관관계가 보고되고 있다(26). 이와 같이 최근에는 포괄적심근변형 직접 측정을 통해 심장 CT가 좌심실 수축 및 이완기능을 평가할 수도 있다. 그러나 전용 분석프로그램이 필요하여 보편화되기엔 한계가 있어 보인다.

좌심실의 수축 기능에는 좌심실 심근 수축력뿐만 아니라 좌심실의 후부하도 영향을 미친다. 전신성 고혈압 등의 증가된 후부하가 심근기능에 미치는 영향을 민감하게 파악하기 위해 단순 혈압 측정 이외에도 상대대동맥 확장성(distensibility) 등의 기능을 검사하기도 한다. Meenakshisundaram 등(27)은 초음파검사를 이용하여, 고혈압환자군에서 정상군에 비해 유의하게 대동맥확장성[(수축기대동맥직경 - 이완기대동맥직경) / 이완기대동맥직경]이 감소되고 대동맥 경직도(stiffness, =  $\text{Log}[\text{수축기혈압} / \text{이완기혈압}] / \text{대동맥확장성}$ )와 좌심실비후는 증가됨을 보고하였다.

## 좌심방 기능 검사지표

좌심방은 심장수축기에 확장하고 심장이완기에 수축한다. 좌심방의 수축을 심방수축기(atrial systole)로 표현하거나 이완기심방기능(diastolic atrial function)으로 표현하기도 해 혼돈이 있을 수 있다. 좌심방의 수축은 심장이완기(diastole)에 해당하는 것으로 통일할 필요가 있다. 좌심방 확장은 폐정맥으로부터 혈액을 수입하며 이 시기를 저장기(reserve phase)라 한다. 좌심방 확장성이 관련된다(1).

심장이완기 동안의 좌심방 수축은 3단계로 구분될 수 있다. 조기수동배출(early passive emptying)기, 통로(conduit)기, 말기능동수축(late active contraction)기로 구성된다. 수동배출기에는 심장수축기 동안 좌심방 확장으로 저장되었던 혈액이 좌심실로 압력 차에 의해 수동적으로 이동(passive flow) 하며, 통로기에는 좌심방의 용적 변화 없이 폐정맥에서 좌심실로 직접 유동(conduit flow)이 발생하고, 능동수축기에는 좌심방의 능동수축에 의한 유동(pumping flow)이 발생한다. 각 단계 혈유동량은 40%, 35%, 25% 정도로 배분된다(Fig. 2B) (28).

심장이완기 좌심방 수축의 독특한 움직임은 통로유동(conduit flow)이다. 이 단계에는 좌심방의 용적 감소는 거의 없으나 좌심실은 완만하지만 지속적인 용적증가를 보이는 중기이완기(dias-tasis)에 해당된다. 결과적으로 시간-용적곡선에서 좌심실 용적증가가 좌심방의 용적 감소보다 크게 측정된다(29). 즉, 통로유동으로 인해 좌심방의 총 출력량은 폐정맥-좌심실 직접 유동량이 더해져 좌심방 용적 감소에 의한 고유 배출량을 상회하게 된다(1).

좌심방은 용적에 비해 벽이 얇아 확장성이 커 좌심실 기능의 완충역할을 수행한다. 좌심방은 확장 및 수동/능동 배출 형태를 조절함으로써 좌심실의 확장기 기능저하를 보완하여 전체 심장 기능을 유지하는 역할을 한다. 즉 능동배출량이 상대적으로 증가할 경우 수동/능동 유동속도 비가 감

소하게 되어 E/A 비와 같이 좌심실 이완기 기능 이상의 지표가 되기도 한다(28). 심장 CT와 MRI에서 좌심방과 좌심실의 시간-용적곡선의 기능 지표들이 좌심실의 이완기 기능 검사에 유용함은 이미 알려져 있다(22, 30). 심장혈관사건(major adverse cardiac events; MACE)을 예측함에 있어 좌심실 수축 기능 이상 및 좌심실 비대에 더하여 좌심방 형태 이상이 독립적이고 추가적인 예측력을 가진다는 보고도 있다(31).

좌심방의 기능을 표시하는 영상지표들은 다양하게 제시된다. 좌심방의 용적은 심혈관 유해효과에 강력한 예측인자로 인정된다(32). 특히 심장이완기 말기의 좌심방 최소 용적이 중대심장사건을 예측하는 가장 좋은 지표로 인정받고 있다. 이 지표는 좌심방의 탄성도(compliance) 및 좌심실 말기 이완기 내강 압력을 잘 반영하는 것으로 보고된다(33). 좌심방의 확장성은 간단하게는 최소 용적 대 좌심방 용적 변화량의 비로 나타낼 수 있으며 이를 확장 지수(expansion index)라 한다. 이 확장 지수는 심장수축기 동안의 좌심방 저장기능(reservoir function)을 대변할 수도 있다(28).

Kühl 등(34)은 심장 CT를 이용하여 좌심방 기능 지표들을 측정하였으며 비ST상승심근경색증(non ST elevation myocardial infarction; NSTEMI) 환자군의 치명률(mortality)과 비교하였다. Cox proportional hazards model에서 나이와 관상동맥 질환, 좌심실 구축률, 심부전등급(Killip class)으로 보정할 경우 좌심방 최대 용적은 예후 예측의 유용성이 인정되지 않았다. 그러나 좌심방 최소 용적, 분획변화(fractional change = 좌심방 용적 변화량 / 좌심방 최대 용적), 좌심방 구축률은 독립적인 예후 예측 능력을 보여주었다. 고해상도 영상인 CT를 이용할 경우 불규칙 형태의 좌심방 용적을 잘 측정할 수 있으며 예후 예측 인자도 도출할 수 있음을 보고하였다.

Lessick 등(35)은 심장 CT를 이용하여 심장이완기 동안의 좌심방 수축 기능을 좌심실 구축률과 같은 개념의 총 배출률(total emptying fraction)로 평가하였다. 이는 좌심방의 용적이나 좌심실의 수축 기능과 무관하게 심부전(heart failure)과 심장사망(cardiac death)을 추가적으로 예측하는데 유용하였으며 최적 경계값은 40%였다(Table 1). 이를 통하여 유증상 심부전 발생 전 초기 예측인자로서 좌심방 총 배출률의 감소가 의미 있음을 제시하였다. 좌심방 총 배출률은 좌심방의 용적 감소를 기반으로 계산하므로 좌심방용적 감소가 미미한 통로기의 배출량은 저평가된다. 따라서 좌심실의 구축률과 같은 신뢰성을 가지지는 못하나 좌심방배출기능을 표현하는 단순 지표로서 가치가 있을 것이다.

좌심방과 좌심실의 종축이 이루는 각도가 좌심실 기능을 반영한다는 보고도 있다. 즉 좌심방의 후부하에 해당하는 좌심실 기능이 좌심방-심실각도의 변형을 초래할 수 있다(36). 심장의 말기이완기에 좌심방용적은 최소가 되고 좌심실용적은 최대가 된다. 이 시점에서의 좌심방/좌심실 용적 비가 좌방실결합지수(left atrioventricular coupling index)로 제시되었으며 이 지수의 변화가 심방세동을 예측하는 유의한 인자로 보고되었다. 10년 동안의 추적검사에서 심장 MRI를 이용하여 측정된 좌방실결합지수 30% 이상 경계값이 심방세동의 발생가능성을 유의하게 예측하였다(37). 이 연구는 좌심방의 말기수축기 기능을 반영하는 정량적 지표를 제시하고 있다. 보고에는 심방세동 예측력만 검증하였으나 좌심방의 수축 기능을 나타내는 지표로 인정된다. 심장 CT 결과에서도 심장이완기 말기 좌심방 능동수축 유동이 잘 관찰되므로 좌방실결합지수는 적용 가능한 기능 지표일 것이다(Table 1).

CT를 이용한 좌심방의 기능 평가 연구는 아직 제한적이다. 아직은 심장 CT의 유효성 검증과 환자의 포괄적 예후 예측인자로서의 유용성을 검증하는 단계라 할 수 있다. 반면 Schweitzer 등(38)은 CT를 이용한 좌심방 기능 지표가 좌심실의 확장 기능 이상을 예측할 수 있음을 보고하였다. 좌심실 확장 기능 이상을 가진 환자에서 좌심방 용적과 통로유동량(conduit volume)의 증가와 초기배출량(early emptying volume)과 총 배출률의 감소가 좌심실 확장 기능 이상의 중증도와 비례적으로 유의한 상관관계를 보였다. 이 연구에서는 총 배출률 4.25% 이하가 좌심실 확장 기능 이상을 민감도 97%와 특이도 69%로 예측할 수 있었다.

## 우심실 기능 지표

폐순환은 가스교환의 과정이며 좌심방의 전부하에 해당된다. 좌심방과 폐정맥 사이는 차단판이 없는 단일구획(single compartment)으로 용적 및 압력부하를 동일하게 받게 된다. 전신순환에 비해 폐순환은 폐동맥과 폐정맥 사이가 가까우므로 폐정맥의 압력부하가 폐동맥이나 우심실로 더 쉽게 영향을 미칠 수 있다. 또한 폐순환은 우심실의 후부하에 해당된다. 폐순환은 상대적으로 말초저항과 유동혈액량이 낮으므로 우심실은 좌심실보다 낮은 후부하를 가진다.

좌측 방실의 기능 이상이 아닌 폐의 실질이상도 폐동맥고혈압, 즉 우심실 후부하 증가를 초래할 수 있으며 이를 폐성심(Cor pulmonale)이라 한다(1). 심장이완기와 수축기에 우심실은 좌심실과 동일한 형태의 용적 변화를 보인다. 대체로 좌심실보다 용적이 조금 더 크므로 시간-용적곡선에서는 좌심실 곡선 위쪽에 유사한 형태의 곡선을 보인다(Fig. 1). 우심실의 전부하는 우심방이다. 전부하의 증가는 가장 흔한 선천성심질환인 심방중격결손증에 의해 초래될 수 있으며 심한 전신순환 동정맥기형(arteriovenous malformation)이 원인이 되기도 한다.

우심실 기능 검사에는 좌심실 기능 지표 대부분을 적용할 수 있다. 심장 CT와 MRI에서 심슨기법 또는 3차원 추출기법을 적용한 우심실의 용적 측정이 가능하다. 관찰창의 제약이 없으므로 심초음파에 비해 포괄적 영상획득이 가능하고 더 정확한 용적 측정이 가능하다. 다만 우심실 형태의 비정형성이 커 구축률 이외의 용적 수치의 신뢰도가 낮다는 보고도 있다(39). 그러나 Fu 등(8)이 보고한 메타분석에서는 MRI와 비교하여 말기이완기용적, 말기수축기용적, 구축률, 일회박출량의 표준평균차이(standard mean difference)가 각각 1.04, 1.22, -0.65, -0.37였으며 유의한 상관계수(0.98, 0.95, 0.98, 0.97)도 보여 우심실 기능 지표 검사에 CT의 유용성은 인정되고 있다. 우심실의 최대/최소 용적 역시 체표면적으로 표준화할 경우 신뢰성은 높아진다(40).

우심실 용적을 기반으로 구축률을 산출하는 기본적 기능 검사는 보편적이다(Table 1). 우심실 용적은 좌심실에 비해 크므로 동일한 출력량을 유지하는 정상의 경우 구축률은 다소 낮은 편이다. 심초음파에서는 우심실 용적 측정의 제약이 있으므로 단순화된 기능 지표가 개발되었는데 삼첨판문수축기운동(tricuspid annular plane systolic excursion; 이하 TAPSE)이다. TAPSE는 심장 수축기 동안 삼첨판륜 외측면의 종축 이동 거리를 의미하며 mm 단위 거리의 2배가 우심실 구축률(%) 정도에 해당된다고 보고되었다. 따라서 우심실 수축 기능 저하를 판단하는 TAPSE의 임계값을 19.7 mm로 제시하였다(41). 심장 CT에서는 우심실 시간-용적곡선을 측정할 수 있으나

TAPSE도 간접지표로서 측정 가능하다(Fig. 3).

우심실은 전부하보다 후부하의 영향을 크게 받으므로 폐고혈압의 확인이 중요하다. 심장 CT에서 폐고혈압을 시사하는 기능 지표들이 있다. 단순한 폐동맥의 확장도 폐고혈압을 시사하는 기본 소견이다. 심전도 동기화 없는 흉부 CT에서도 폐동맥 직경이 폐동맥고혈압을 유의하게 예측한다고 보고되었다(주폐동맥[main pulmonary artery] 평균직경  $35 \pm 6$  mm vs.  $27 \pm 2$  mm). 단순히 주폐동맥의 직경이 인접 상행대동맥보다 커질 경우에도 폐고혈압으로 간주되었다. 주폐동맥의 직경 29 mm를 임계치로 폐동맥고혈압 예측의 민감도는 87%, 특이도는 89%로 보고되었다(42). 폐동맥의 확장성도 심장 CT에서 측정이 가능하다. 우폐동맥의 최대면적 대비 면적변화량 비율(arterial distensibility)을 측정하여 폐고혈압 진단과 위험도 분류에 유용함이 보고되었다(43). 폐고혈압은 우심실의 후부하를 증가시켜 우심실 형태 변형을 초래한다. Tan 등(44)은 폐고혈압에서 우심실 전벽의 비후(6 mm 이상), 우좌심실 두께 비의 증가(0.32 이상), 우좌심실 내강직경비 증가(1.28 이상), 주폐동맥/상행대동맥 직경비 증가(0.84 이상) 등의 변형을 구체적으로 제시하였다.

### 우심방 기능 지표

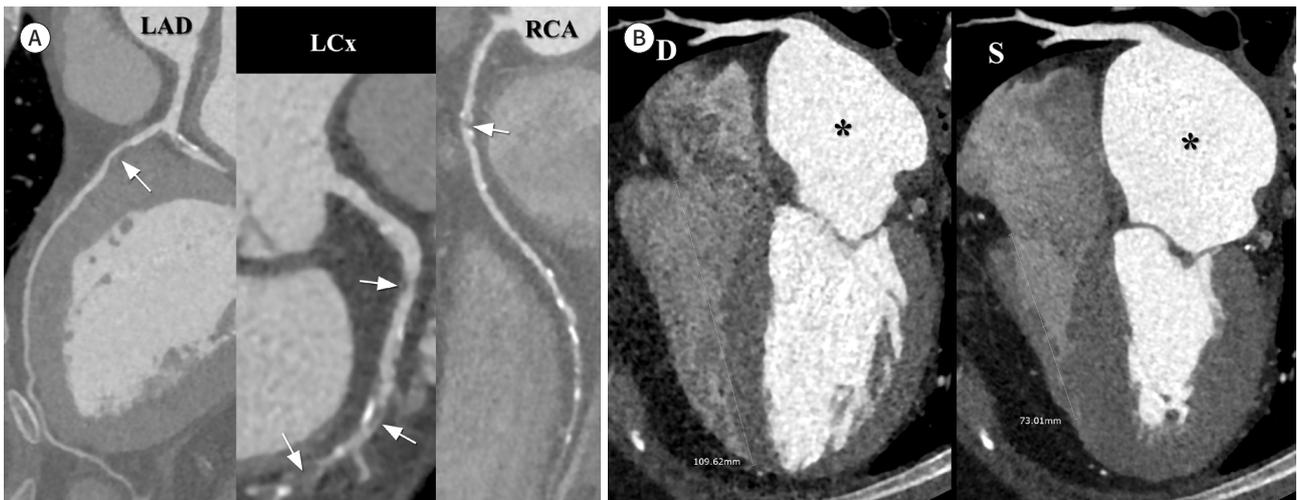
우심방은 좌심방과 동일한 형태의 심박동주기 내 용적 변화를 보인다. 우심방은 상하대정맥 및 관상정맥동과 단일 구획이다. 따라서 우심방의 용적과부하 시 연결된 정맥들의 확장이 관찰될 수 있다. 우심방의 후부하는 우심실이다. 즉 우심실의 이완기능 저하가 우심방에 영향을 미친다. 또한 발살바법도 우심방 및 우심실의 후부하증가에 기여한다. 우심방의 전부하는 전신 정맥이다. 말초동정맥기형이나 폐정맥환류이상(anomalous pulmonary venous return) 등에 의한 전신 정맥

**Fig. 3.** A retrospective ECG-gated cardiac CT scan of a 69-year-old male with intermittent chest discomfort during exertion. This patient has a 20-year history of hypertension and is currently medicated.

**A.** LAD, LCx, and RCA show multiple borderline stenosis (arrows) due to both soft and calcified plaques.

**B.** Four-chamber view at end-diastole (D) and mid-systole (S) demonstrates a prominent left atrium (\*). Tricuspid annular plane systolic excursion is measured as 36.6 mm without right ventricular systolic dysfunction.

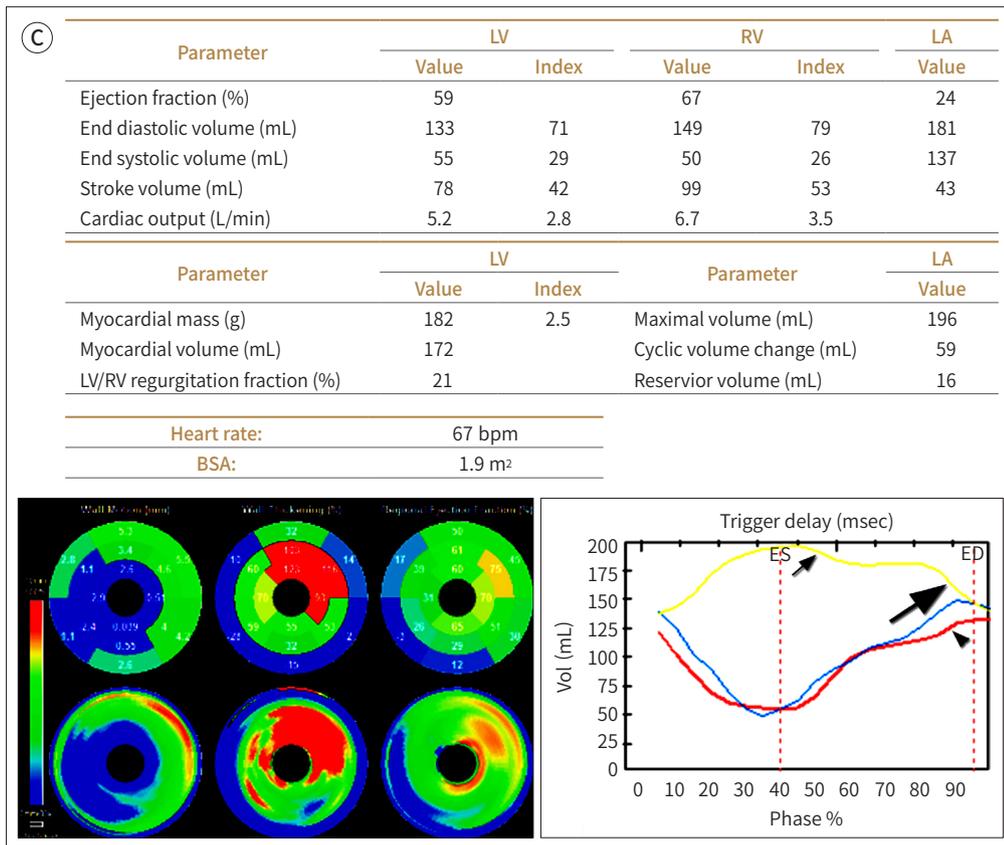
ECG = electrocardiogram, LAD = left anterior descending, LCx = left circumflex, RCA = right coronary artery



**Fig. 3.** A retrospective ECG-gated cardiac CT scan of a 69-year-old male with intermittent chest discomfort during exertion. This patient has a 20-year history of hypertension and is currently medicated.

**C.** Three-chamber function analysis indicates normal LV systolic parameters, including a LVEF of 59% and an EDVI of 71 mL/m<sup>2</sup>. The LVMM indexed according to BSA is at the upper limit of normal (95 g/m<sup>2</sup>), whereas the myocardial contraction fraction (LVEF/LVMM) is significantly low (32%) (20). Additionally, the left atrial maximal volume is increased with a dominant late atrial contraction volume (large arrow) exceeding the reservoir volume (small arrow). The LV time-volume curve (red) exhibits weaker active filling volume (arrowhead) compared with the left atrial late contraction volume, suggesting diastolic dysfunction. This comprehensive multi-chamber functional assessment reveals diastolic and possible systolic dysfunction of the left ventricle, even at rest.

BSA = body surface area, ECG = electrocardiogram, ED = end diastole, EDVI = end-diastolic volume index, ES = end systole, LA = left atrium, LV = left ventricular, LVEF = left ventricular ejection fraction, LVMM = LV myocardial mass, RV = right ventricle



환류(systemic venous return) 증가가 전부하 증가에 해당된다. 또한 역발살바법 또는 과흡기도 우심방 전부하 증가에 기여한다.

CT를 이용한 우심방 기능 검사는 분석프로그램이 다양하지 않아 아직 보편화되지 않았으며 별도의 검증 과정이 필요할 것이다. 우심방의 고전적 기능 지표는 최대 용적, 용적 변화량, 최소 용적 등이다. Budoff 등(45)은 CT를 이용한 좌우 심방의 용적 및 배출률을 측정하여 남녀 간의 정상치 차이가 있음을 보고하였으며 CT의 유용성을 제시하였다. 또한 관상동맥 질환시 좌우 심방 기능의 일부가 유의한 차이를 보임을 관찰하였다(Table 1).

이론적으로는 우심방 울혈(congestion)이 발생할 경우 우심방 용적은 증가한다. 또한 연결된 관상정맥동(coronary sinus), 하대정맥, 상대정맥의 확장도 관찰될 수 있다. 조영증강 CT의 경우

상대정맥으로 유입된 조영제가 우심방에서 하대정맥으로 역류하고 간정맥까지 조영하게 되는 경우가 있다. 이는 우심방의 울혈을 의심케 하나 3 mL/s 이상 조영제 주입속도로 촬영한 CT의 경우 이러한 소견이 전신 정맥역류로 인정될 수 없다는 보고가 있다(46). 조영제 급속 주입의 경우 조영제 볼루스가 지연 없이 우심방에 도달하게 되어 심장박동 주기마다 수 mL 이상의 우심방 전부하 증가 효과를 나타낸다. 또한 호흡 중지 상태에서는 우방실의 후부하가 증가된 상태이므로 우심방의 저장기능 상승에도 한계를 가진다. 이 경우 우심방과 단일 구획을 이루는 하대정맥으로 조영제 역류가 발생할 수 있다. 따라서 전신 정맥 울혈과 관련된 다른 소견들과 같이 고려해야 할 것이다.

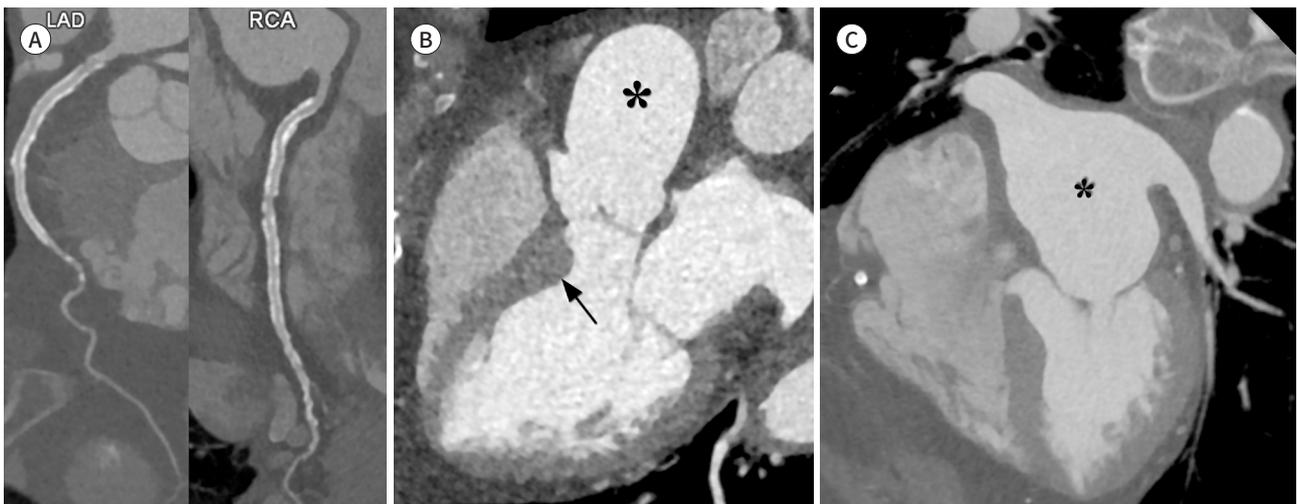
TAPSE는 우심실 기능의 단순한 간접지표로 이용될 수 있다. Sivak 등(47)은 심초음파를 이용한 연구에서 TAPSE를 수동충만기와 말기능동충만기로 나누어 우심방의 수동적, 능동적 배출기능을 비교할 수 있다고 보고하고 있다. 빈맥(tachycardia)이 아닌 경우 CT에서도 이러한 비교는 가능하다.

### 포괄적 심장 기능 평가

심장 기능 이상의 경우 흉부불쾌감, 운동시 호흡곤란, 전신저혈압, 저산소증, 심장실신, 사지부종 등의 증상이 나타난다. 심장의 박출기능 저하와 심장으로 들어가는 혈류의 울혈에 의한 증상이다. 이 과정에서 가스교환 및 대사물질 운송의 저하도 발생할 것이다. 심장의 펌프로서 역할이 부족할 경우 그 원인을 파악하기 위하여 심장순환계의 각 단계별 기능 검사가 필요하며 심장 내 4개의 방실 별 기능분석이 도움이 된다(Figs. 3, 4).

**Fig. 4.** A retrospective ECG-gated cardiac CT of an 84-year-old female with persistent dyspnea on exertion six years after coronary recanalization. This patient has had systemic hypertension managed with medication for 12 years.

- A.** CT coronary angiography shows patent stents in the LAD and RCA. No other significant coronary artery stenosis was noted.
  - B.** A left ventricular outflow tract view shows basal septal bulging (arrow) and ascending aortic prominence (\*), suggestive of hypertensive remodeling.
  - C.** A four-chamber view shows a dilated left atrium (\*). The long axis strain has decreased (11%).
- ECG = electrocardiogram, LAD = left anterior descending, RCA = right coronary artery

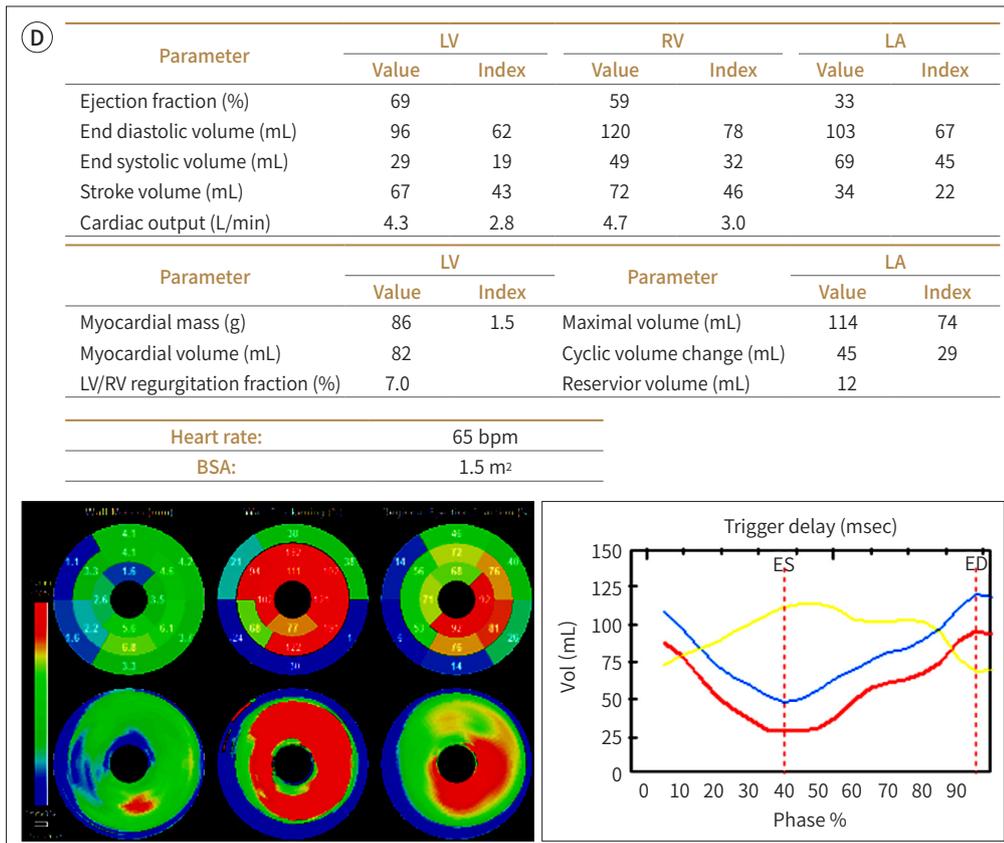


**Fig. 4.** A retrospective ECG-gated cardiac CT of an 84-year-old female with persistent dyspnea on exertion six years after coronary recanalization. This patient has had systemic hypertension managed with medication for 12 years.

**D.** A three-chamber function report suggests decreased LV early diastolic filling fraction (24%) but a normal ejection fraction, myocardial muscle mass index, end-diastolic volume index, and cardiac output index. The LA shows increased maximum and minimum volume indices (76 and 46 mL/m<sup>2</sup>), decreased reserve flow fraction (14%), and increased pumping flow fraction (39%) but normal emptying fraction. The right ventricular functional parameters are normal.

Interpretation: these findings of a resting state CT suggest LV apical systolic and possible diastolic dysfunction, left atrial dilatation with compensated normal function through augmented late contraction, normal right ventricular function, and normal global cardiac function. During exertion, left atrial compensation should be attenuated, provoking left atrial dysfunction and dyspnea.

BSA = body surface area, ECG = electrocardiogram, ED = end diastole, ES = end systole, LA = left atrium, LV = left ventricular, RV = right ventricle



심장 기능 이상의 흔한 이상으로는 좌심실 수축 기능 이상이며 그중 허혈성심근증이 주된 원인이다. 허혈성심근증의 주된 원인인 죽상동맥경화증에 의한 관상동맥 협착을 선제적으로 확인하기 위하여 침습적/비침습적 관상동맥 조영술을 우선적으로 고려하게 된다. 빈도와 중요도에 따른 우선적 검사 방법 선택에 해당된다. 그러나 심장의 각 단계별 기능 검사는 심장 기능부전의 원인을 더욱 면밀하게 파악할 수 있게 한다. 따라서 포괄적인 방실 별 기능 평가가 가능한 CT와 MRI는 중요한 검사기법이다. 방실 별 기능 지표들은 모두 분석할 경우 방실 간의 상호작용을 검사하는 지표를 생성할 수도 있다. 심장 CT에서 좌우심실의 박출량은 기본적으로 측정이 가능하므로 단순 비율인 폐/전신혈류량(Q<sub>p</sub>/Q<sub>s</sub>)의 계산이 가능하다(Fig. 1) (48).

심장 기능을 나타내는 다양한 방식 별 기능 지표들은 연구되어 적용되고 있으나 정상기준치들은 보고마다 많은 차이를 보인다(1). 연구 대상군의 특성과 규모에 따라 정상치와 정상범위를 대변하는 인자가 다를 수 있다. 정상범위를 신뢰구간(confidence interval)으로 표시하는 것이 신뢰도가 높으나 대상군의 규모가 작을 경우 정상범위가 매우 엄격하게 적용되어 비정상이 과평가될 수 있다. 기준 범위(reference range)는 평균과 표준편차를 이용한 정상범위로서 손쉽게 구할 수 있으나 해당 연구 대상군 특성과 다른 대상에도 적용하는 일반화(generalization)에는 한계가 존재한다. 그러나 동일 기관에서 동일방법으로 적용할 경우에는 유용성이 있을 것이다. 대규모 연구를 통하여 정상범위를 충분히 포함할 수 있는 신뢰구간이 각 기능 지표마다 설정될 필요가 있으며 우선은 각 기관별로 적절한 정상기준을 선정하여 사용해야 할 것이다(Table 1).

## 결론

심장 CT는 높은 공간해상도와 수용 가능한 시간해상도를 기반으로 심장방실의 시간-용적곡선을 측정할 수 있는 훌륭한 영상기법이다. 심장 CT의 고전적 역할인 관상동맥 개존성 분석을 넘어 방식 별 기능분석의 유용성도 확인되고 있다. 심장 CT는 비침습적 고화질 영상 제공의 좋은 방법론일 뿐만 아니라 심장의 기능적 온전성과 환자의 건강을 확인하는 도구로 발전할 수 있을 것이다.

## Conflicts of Interest

Jongmin Lee has been a Section Editor of the Journal of the Korean Society of Radiology since 2014 and was guest editor of this special issue titled “Challenging to the Limit of Cardiac CT”; however, he was not involved in the peer reviewer selection, evaluation, or decision process of this article.

## ORCID iD

Jongmin Lee  <https://orcid.org/0000-0002-4163-913X>

## Funding

None

## REFERENCES

1. Lee J. Three-chamber function with cardiac CT. In Schoepf U, ed. *CT of the heart. Contemporary medical imaging*. 1st ed. Totowa, NJ: Humana 2019:423-440
2. Mohrman DE. *Cardiovascular physiology*. 6th ed. New York: McGraw-Hill 2006:256
3. Longo DL. *Harrison's principles of internal medicine*. New York: McGraw-Hill 2012
4. Takx RA, Moscariello A, Schoepf UJ, Barraza JM Jr, Nance JW Jr, Bastarrika G, et al. Quantification of left and right ventricular function and myocardial mass: comparison of low-radiation dose 2nd generation dual-source CT and cardiac MRI. *Eur J Radiol* 2012;81:e598-e604
5. Hergan K, Schuster A, Frühwald J, Mair M, Burger R, Töpker M. Comparison of left and right ventricular volume measurement using the Simpson's method and the area length method. *Eur J Radiol* 2008;65:270-278
6. Tanabe Y, Kido T, Kurata A, Sawada S, Suekuni H, Kido T, et al. Three-dimensional maximum principal strain using cardiac computed tomography for identification of myocardial infarction. *Eur Radiol* 2017;27:1667-1675
7. Groen JM, van der Vleuten PA, Greuter MJ, Zijlstra F, Oudkerk M. Comparison of MRI, 64-slice MDCT and DSCT in assessing functional cardiac parameters of a moving heart phantom. *Eur Radiol* 2009;19:577-583
8. Fu H, Wang X, Diao K, Huang S, Liu H, Gao Y, et al. CT compared to MRI for functional evaluation of the right ventricle: a systematic review and meta-analysis. *Eur Radiol* 2019;29:6816-6828

9. Kara B, Nayman A, Guler I, Gul EE, Koplay M, Paksoy Y. Quantitative assessment of left ventricular function and myocardial mass: a comparison of coronary CT angiography with cardiac MRI and echocardiography. *Pol J Radiol* 2016;81:95-102
10. Rigolli M, Anandabaskaran S, Christiansen JP, Whalley GA. Bias associated with left ventricular quantification by multimodality imaging: a systematic review and meta-analysis. *Open Heart* 2016;3:e000388
11. Mao SS, Li D, Vembar M, Gao Y, Luo Y, Lam F, et al. Model-based automatic segmentation algorithm accurately assesses the whole cardiac volumetric parameters in patients with cardiac CT angiography: a validation study for evaluating the accuracy of the workstation software and establishing the reference values. *Acad Radiol* 2014;21:639-647
12. Nicol ED, Stirrup J, Roughton M, Padley SP, Rubens MB. 64-channel cardiac computed tomography: intraobserver and interobserver variability, part 2: global and regional ventricular function, mass, and first pass perfusion. *J Comput Assist Tomogr* 2009;33:169-174
13. Yang CC, Mok GS, Law WY, Hsu SM, Wu TH, Chen LK. Potential dose reduction of optimal ECG-controlled tube current modulation for 256-slice CT coronary angiography. *Acad Radiol* 2011;18:731-737
14. Zhang J, Kang S, Han D, Xie X, Deng Y. Application of intelligent optimal kV scanning technology (CARE kV) in dual-source computed tomography (DSCT) coronary angiography. *Int J Clin Exp Med* 2015;8:17644-17653
15. Kawel-Boehm N, Kronmal R, Eng J, Folsom A, Burke G, Carr JJ, et al. Left ventricular mass at MRI and long-term risk of cardiovascular events: the multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA). *Radiology* 2019;293:107-114
16. Kang EJ, Lee KN, Choi WJ, Kim YD, Shin KM, Lim JK, et al. Left ventricular functional parameters and geometric patterns in Korean adults on coronary CT angiography with a 320-detector-row CT scanner. *Korean J Radiol* 2017;18:664-673
17. Vanhoenacker PK, Van Hoe LR. A simple method to estimate cardiac function during routine multi-row detector CT exams. *Eur Radiol* 2007;17:2845-2851
18. Zeb I, Li D, Nasir K, Gupta M, Kadakia J, Gao Y, et al. Computerized left ventricular regional ejection fraction analysis for detection of ischemic coronary artery disease with multidetector CT angiography. *Int J Cardiovasc Imaging* 2013;29:685-692
19. Rodrigues JCL, Rooms B, Hyde K, Rohan S, Nightingale AK, Paton J, et al. The corrected left ventricular ejection fraction: a potential new measure of ventricular function. *Int J Cardiovasc Imaging* 2021;37:1987-1997
20. Arenja N, Riffel JH, Fritz T, André F, Aus dem Siepen F, Mueller-Hennessen M, et al. Diagnostic and prognostic value of long-axis strain and myocardial contraction fraction using standard cardiovascular MR imaging in patients with nonischemic dilated cardiomyopathies. *Radiology* 2017;283:681-691
21. Nagueh SF, Smiseth OA, Appleton CP, Byrd BF 3rd, Dokainish H, Edvardsen T, et al. Recommendations for the evaluation of left ventricular diastolic function by echocardiography: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2016; 29:277-314
22. Boogers MJ, van Werkhoven JM, Schuijff JD, Delgado V, El-Naggar HM, Boersma E, et al. Feasibility of diastolic function assessment with cardiac CT: feasibility study in comparison with tissue Doppler imaging. *JACC Cardiovasc Imaging* 2011;4:246-256
23. Qiao E, Amin K, Hippe DS, Krieger EV, Dubinsky TJ. The heart as a spring, the measurement of myocardial bounce to assess left ventricular function on cardiac MR. *Int J Cardiovasc Imaging* 2021;37:1699-1707
24. Guo X, Gong C, Song R, Wan K, Han Y, Chen Y. First-pass perfusion cardiovascular magnetic resonance parameters as surrogate markers for left ventricular diastolic dysfunction: a validation against cardiac catheterization. *Eur Radiol* 2022;32:8131-8139
25. Smiseth OA, Torp H, Opdahl A, Haugaa KH, Urheim S. Myocardial strain imaging: how useful is it in clinical decision making? *Eur Heart J* 2016;37:1196-1207
26. Buss SJ, Schulz F, Mereles D, Hosch W, Galuschky C, Schummers G, et al. Quantitative analysis of left ventricular strain using cardiac computed tomography. *Eur J Radiol* 2014;83:e123-e130
27. Meenakshisundaram R, Kamaraj K, Murugan S, Thirumalaikolundusubramanian P. Aortic stiffness and distensibility among hypertensives. *Ann N Y Acad Sci* 2009;1173(Suppl 1):E68-E71
28. Hoit BD. Left atrial size and function: role in prognosis. *J Am Coll Cardiol* 2014;63:493-505
29. Boudoulas KD, Paraskevaidis IA, Boudoulas H, Triposkiadis FK. The left atrium: from the research laboratory to the clinic. *Cardiology* 2014;129:1-17

30. Aquaro GD, Pizzino F, Terrizzi A, Carerj S, Khandheria BK, Di Bella G. Diastolic dysfunction evaluated by cardiac magnetic resonance: the value of the combined assessment of atrial and ventricular function. *Eur Radiol* 2019;29:1555-1564
31. Kizer JR, Bella JN, Palmieri V, Liu JE, Best LG, Lee ET, et al. Left atrial diameter as an independent predictor of first clinical cardiovascular events in middle-aged and elderly adults: the Strong Heart Study (SHS). *Am Heart J* 2006;151:412-418
32. Tsang TS, Abhayaratna WP, Barnes ME, Miyasaka Y, Gersh BJ, Bailey KR, et al. Prediction of cardiovascular outcomes with left atrial size: is volume superior to area or diameter? *J Am Coll Cardiol* 2006;47:1018-1023
33. Caselli S, Canali E, Foschi ML, Santini D, Di Angelantonio E, Pandian NG, et al. Long-term prognostic significance of three-dimensional echocardiographic parameters of the left ventricle and left atrium. *Eur J Echocardiogr* 2010;11:250-256
34. Kühn JT, Møller JE, Kristensen TS, Kelbæk H, Kofoed KF. Left atrial function and mortality in patients with NSTEMI an MDCT study. *JACC Cardiovasc Imaging* 2011;4:1080-1087
35. Lessick J, Mutlak D, Mutlak M, Sheik-Muhamad R, Naami R, Efraim R, et al. Left atrial function by cardiac computed tomography is a predictor of heart failure and cardiovascular death. *Eur Radiol* 2022;32:132-142
36. Al-Mohaissen MA, Chow BJW, Lee T, Chan KL. Left atrial-left ventricular angle, a new measure of left atrial and left ventricular remodeling. *Int J Cardiovasc Imaging* 2022;38:435-445
37. Pezel T, Ambale-Venkatesh B, Quinaglia T, Heckbert SR, Kato Y, de Vasconcellos HD, et al. Change in left atrio-ventricular coupling index to predict incident atrial fibrillation: the multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA). *Radiology* 2022;303:317-326
38. Schweitzer A, Agmon Y, Aronson D, Abadi S, Mutlak D, Carasso S, et al. Assessment of left sided filling dynamics in diastolic dysfunction using cardiac computed tomography. *Eur J Radiol* 2015;84:1930-1937
39. Pickett CA, Cheezum MK, Kassop D, Villines TC, Hulten EA. Accuracy of cardiac CT, radionuclide and invasive ventriculography, two- and three-dimensional echocardiography, and SPECT for left and right ventricular ejection fraction compared with cardiac MRI: a meta-analysis. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2015;16:848-852
40. Chang SA, Choe YH, Jang SY, Kim SM, Lee SC, Oh JK. Assessment of left and right ventricular parameters in healthy Korean volunteers using cardiac magnetic resonance imaging: change in ventricular volume and function based on age, gender and body surface area. *Int J Cardiovasc Imaging* 2012;28(Suppl 2):141-147
41. Sato T, Tsujino I, Oyama-Manabe N, Ohira H, Ito YM, Sugimori H, et al. Simple prediction of right ventricular ejection fraction using tricuspid annular plane systolic excursion in pulmonary hypertension. *Int J Cardiovasc Imaging* 2013;29:1799-1805
42. Chan AL, Juarez MM, Shelton DK, MacDonald T, Li CS, Lin TC, et al. Novel computed tomographic chest metrics to detect pulmonary hypertension. *BMC Med Imaging* 2011;11:7
43. Revel MP, Faivre JB, Remy-Jardin M, Delannoy-Deken V, Duhamel A, Remy J. Pulmonary hypertension: ECG-gated 64-section CT angiographic evaluation of new functional parameters as diagnostic criteria. *Radiology* 2009;250:558-566
44. Tan RT, Kuzo R, Goodman LR, Siegel R, Haasler GB, Presberg KW. Utility of CT scan evaluation for predicting pulmonary hypertension in patients with parenchymal lung disease. *Chest* 1998;113:1250-1256
45. Budoff MJ, Pagali SR, Hamirani YS, Chen A, Cheu G, Gao Y, et al. Sex-specific biatrial volumetric measurements obtained with use of multidetector computed tomography in subjects with and without coronary artery disease. *Tex Heart Inst J* 2014;41:286-292
46. Yeh BM, Kurzman P, Foster E, Qayyum A, Joe B, Coakley F. Clinical relevance of retrograde inferior vena cava or hepatic vein opacification during contrast-enhanced CT. *AJR Am J Roentgenol* 2004;183:1227-1232
47. Sivak JA, Raina A, Forfia PR. Assessment of the physiologic contribution of right atrial function to total right heart function in patients with and without pulmonary arterial hypertension. *Pulm Circ* 2016;6:322-328
48. Yamasaki Y, Nagao M, Kawanami S, Kamitani T, Sagiyama K, Yamanouchi T, et al. One-stop shop assessment for atrial septal defect closure using 256-slice coronary CT angiography. *Eur Radiol* 2017;27:697-704
49. Christiaens L, Varroud-Vial N, Ardilouze P, Ragot S, Mergy J, Bonnet B, et al. Real three-dimensional assessment of left atrial and left atrial appendage volumes by 64-slice spiral computed tomography in individuals with or without cardiovascular disease. *Int J Radiol* 2010;140:189-196

## CT를 이용한 심장 기능 검사

이종민\*

심장 기능의 포괄적인 결과는 심장박출량과 전신 정맥 환류로 표현된다. 심장의 4개의 방실은 각자 고유한 기계적 기능을 가진다. 심장방실과 판막, 폐순환 시스템은 전부하 또는 후부하의 형태로 상호 연관되어 있다. 심장 기능 장애는 전반적인 심장 기능의 실패로 전형적인 임상 증상을 나타낸다. 심장 기능 장애의 근본 원인을 조사하려면 심장 내 혈류 유동 경로에 대한 단계별 평가가 필요하다. 이러한 맥락에서, 심장의 세부 구조를 볼 수 있는 영상검사의 표지자는 심장 기능 평가에 중요한 역할을 한다. 영상기반 평가를 통해 개별 심장 구성 요소의 기능을 단계별로 조사할 수 있다. 심장 기능 평가를 위한 영상검사 중 최근 심장 CT가 포함되고 검증되었다. 본 종설에서는 포괄적 및 단계별 심장 기능 평가를 위한 심장 CT 기반 영상 표지자에 대해 논의하겠다.

경북대학교 의과대학 경북대학교병원 영상의학과