삼차원 경흉부 심초음파: 좌심실 기능 평가

양현숙^{1,2}¹건국대학교병원 심장혈관내과, ²건국대학교 의학전문대학원 의학연구소

Three-dimensional Transthoracic Echocardiography: Left Ventricular Analysis

Hyun Suk Yang

¹Department of Cardiovascular Medicine, Konkuk University Medical Center, Seoul; ²Research Institute of Medical Science, Konkuk University School of Medicine, Seoul, Korea

Since 2016, both three-dimensional (3D) echocardiography and two-dimensional strain echocardiography are specialist classifications (simple, general, and specialist levels) in Korea. 3D is further considered by some only as a research tool, requiring exceptional time and effort and impractical for clinical use. But recent advances in fully automated software for left ventricular chamber quantification have shown promise in making 3D echocardiography quick and easy. The aims of this review article are to focus on left ventricular analysis to show currently-available 3D echo is indeed no longer especially time-consuming or difficult, and to describe upcoming 3D enhancements.

Keywords: Three-dimensional echocardiography; Left ventricular function; Strain

서론

보건복지부에서 2016년 고시한 초음파검사 수가 기준에 따르면, 경흉부 심초음파(transthoracic echocardiography, TTE) 검사에서 삼차원(3D) 또는 strain 옵션을 추가할 경우, 심실 기능에 대한 정밀 검사를 실시한 경우로 평가되어 전문 심초음파로 분류되고 상대적으로 높은 수가를 산정받게 되어 있다(Fig 1). 이에 일반적 이면성(2D) TTE 영상에 post-processing으로 speckle tracking 2D strain을 적용하는 임상적 행태가 점차 확

산되고 있다. 이와는 달리 전문 심초음파의 다른 한 축에 서 있는 삼차원 심초음파의 보급에 있어서는 이미징에 많은 시간이 소요되고, 분석이 복잡할 것이란 오랜 선입관이 우선적으로 극복되어야 할 과제로 여겨진다.

필자가 2000년대 3D TTE practical guide를 미국심초음파학회 종설로 실을 무렵에서[1] 현재 2019년을 바라보면, 하드웨어 및 소프트웨어의 눈부신 발전과 더불어 삼차원 심초음파 영역에 다음과 같은 큰 변화들이 있음을 감지할 수 있다. 첫째, 3D imaging 영역의 변화이다. 당시에는 “real-time”이란 접두사를

Address for Correspondence: Hyun Suk Yang, M.D., Ph.D.

Department of Cardiovascular Medicine, Konkuk University Medical Center, Research Institute of Medical Science, Konkuk University School of Medicine, 120-1 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05030, Korea
Tel: +82-2-2030-7519, Fax: +82-2-2030-7748
E-mail: yang.hyun@gmail.com

Received : 2019. 5. 7

Revised : 2019. 5. 9

Accepted : 2019. 5. 9

3D 앞에 즐겨 붙였었는데, 한 3D 영상을 얻기 위해 거쳐야 했던 복잡한 “reconstruction”과 대조적으로 바로 검사 중에 이미지가 나오도록 강조한 신 유행어였다. 그런 관점에서 본다면 더 이상 “real-time”이란 접두사는 불필요할 것 같다. 지금은 real-time이 아닌 3D는 없다. 단지 당시에는 심전도 gating을 하면서 여러 조각을 모아서 하나의 좌심실 또는 볼륨을 형성하는 “near real-

time” 3D 시대였다고 한다면, 지금은 volume rate가 높아지면서 궁극적으로 “true real-time” 3D 시대에 접어든 것이다. 둘째, 3D analysis 영역에서의 변화이다. 3D volume을 rendering함에 있어서 사용자 편의에 맞춘 fully automated software가 개발되어, 심지어는 axis를 맞추거나 reference points를 찍어줄 필요도 없이, one-click으로 원하는 심장의 용적과 기능 지표들을 순식간에

초음파검사 개정 관련 1차, 2차 Q&A 합본

(수가) 보건복지부 고시 제2016-149호, 제2016-188호 관련('16.10.1.시행)

(기준) 보건복지부 고시 제2016-175호('16.10.1.)→ 고시 제2016-207호 관련('16.11.7.변경)

(연번1) Q&A는 「초음파 검사의 급여기준」에 따른 <급여대상>에게 급여 적용 시 참고자료임을 알려드립니다.

<급여대상>

1. 「본인일부부담금 산정특례에 관한 기준」에 따른 산정특례 대상자 중

1) 암, 심장질환, 뇌혈관질환, 희귀난치성 질환

-해당 산정특례 적용기간 중 대상 상병 및 관련 합병증에 대한 진료를 하는 경우

2) 암, 심장질환, 뇌혈관질환, 희귀난치성 질환이 의심되어 실시할 경우 -1회 인정

※ 행위정의

요양기관업무포털서비스 → 신청 및 자료제출 → 행위평가신청 → 고시항목조회

연번	질의	답변	비고
2	분류 체계 개편 시 주요 변경사항	<p>(level 수가 도입) 초음파 검사는 CT, MRI와 달리 탐촉자를 이용하여 의사가 시행하므로 이상여부 판단이 실시간으로 이루어지며, 이상이 있을 경우 추가검사 과정 중 난이도가 달라지는 경우가 있어 (도플러 혹은 이상부위 계측, 기능검사 등) level 수가를 도입함.</p> <p><예시> 경흉부 심장초음파, 간·담도·담낭·비장·췌장 초음파, 연부조직 초음파, 임신부초음파의 기형아계측 등</p>	1차 (수가)
74	나943 경흉부심초음파 산정 방법	<p>나943가 경흉부심초음파는 환자의 상태에 따른 검사난이도를 반영한 수가로 아래와 같이 산정함. 단, 3D 또는 Strain으로 추가 검사할 경우에도 해당 항목 소정점수에 포함됨. 또한, 담당 의사가 환자 상태등을 의학적으로 고려하여 ‘전문’에 해당하는 검사를 실시하더라도 ‘단순’ 또는 ‘일반’으로 산정가능하며, ‘일반’에 해당하는 검사를 실시하더라도 ‘단순’으로 산정가능함.</p> <p style="text-align: center;">-아 래-</p> <p>(단순) 2D, M-mode, Color Doppler 이용한 검사와 좌심실구혈률 측정</p> <p>(일반) 2D, M-mode, Color Doppler, Spectral Doppler 이용한 검사와 좌심실용적측정 등 정량분석까지 실시한 경우</p> <p>(전문) 단순 또는 일반 검사 후 추가적으로 관상동맥, 판막, 심실 기능에 대한 정밀 검사까지 실시한 경우</p>	2차 (수가)

Figure 1. Data from Korean Ministry of Health and Welfare. Modified from reference [16]. CT, computed tomography; MRI, magnetic resonance image.

얻을 수 있게 되었다[2-5].

삼차원 심초음파 영상을 처음 시작하는 분들에게는 2012년 미국심초음파학회 가이드라인을 추천한다[6]. 본 종설은 좌심실의 용적과 기능 평가에 대한 현재 삼차원 심초음파의 적용 실례를 중심으로 서술하고자 한다.

좌심실 기능: 3D vs. 2D

삼차원 심초음파로 좌심실 용적과 좌심실 구혈률을 구하고자 하는 것은 임상에서 가장 널리 적용되고 있는 삼차원 심초음파의 적용 범주이다. M-mode 심초음파에서 수축기말과 이완기말 좌심실 내경을 측정하여 좌심실의 수축력을 추정하는 것은 일차원적 기법이고, 2D modified biplane Simpson's method를 통하여 두 평면 영상에서 수축기말과 이완기말의 좌심실 내막 경계를 tracing하여 계산한 것은 이차원적 기법이다. 이차원적 기법은 일차원 M-mode와 비교할 때 심첨부에 대한 정보나 다른 벽에 대한 추가적인 정보(예를 들면, 심첨4방도, 심첨2방도)를 얻기에 도움이 된다. 하지만 심실이 확장되고 국소 벽운동 장애 등으로 내강의 구조에 변화가 있는 경우, 혹은 불규칙한 리듬에서 서로 다른 심주기의 두개의 이차원 평면 영상이 얻어진 경우에서 추정한 용적이 실제 삼차원적 심실 용적을 잘 반영한다고 보기 어렵다. 이에 반해, 삼차원 심초음파는 보다 상세한 공간적인 정보를 포함하면서 동시에 모든 좌심실 벽의 움직임을 파악할 수 있으므로 리듬이 불규칙한 경우에도 분석이 가능한 장점이 있으며[7,8], 이의 정확도에 대해서는 이미 여러 연구에서 심장 magnetic resonance image와 견주어 검증된 바 있다[4,8-10].

삼차원 심초음파로 좌심실 전반적인 기능을 평가하는 기본적인 변수로서, 수축기말 용적(end-systolic volume, ESV), 이완기말 용적(end-diastolic volume, EDV), 일회 박출량(stroke volume, SV), 좌심실 구혈률(left ventricular ejection fraction [LVEF] (%) = $100 \times SV/EDV$) 등이 있다. 좌심실 벽의 국소적인 운동을 평가하기 위해서는 multi-slice 2D (Fig. 2) rendering이 도움되며, 좌심실 벽의 deformation을 3D strain으로 정량화하거나(16 or 17 segments), 각 구획별로 수축기 때 가장 작은 볼륨으로 되는 시점까지의 '볼륨-시간' 자료를 통해서 정량적으로 분석한다. 특히 3D strain은 장점이 있는데, 2D에서는 speckle을 따라 가려고 하나 이차원적 평면을 벗어난 움직임 즉 "out-of-plane motion"을 추적하는 데 한계가 있다는 것 때문이다[11].

다음은 상기한 삼차원 심초음파 변수들을 얻기 위해 이미지

만드는 법(imaging)과 분석하는 법(analysis)을 현재 상용되고 있는 심초음파 기계들을 활용하여 그 실제 적용을 간단히 기술하고자 한다(EPIQ CVx [Philips, Andover, MA, USA], X5-1 probe [Vivid E95, GE Healthcare, Wauwatosa, WI, USA], 4V-D probe [ACUSON SC2000, Siemens Healthineers, Mountain View, CA, USA]). 본 종설은 기계별 특징점을 설명하려는 의도가 없음을 분명히 하고자 한다. 결국 모든 기계가 기술 발전을 통해서 최상의 삼차원 영상 구현을 위해 끊임 없이 변화해 가는 선상에 있으면서, 시장에서 지금 상용되고 있지는 않으나 이미 연구자들이 쓰고 있는 기능들도 다수 갖고 있기 때문이다.

좌심실 이미지 획득(left ventricular imaging)

삼차원 영상을 위해서는 필요하다면 삼차원 심초음파용 탐촉자로 바꾸어야 한다. 이미 탐촉자 하나로 모든 것을 구현하는 기계가 상용화되어 있으며, 점차적으로 one-probe solution, 즉 하나의 probe로 2D와 3D 영상을 자유 자재로 만드는 추세로 가고 있다. 일반적으로 말하면, 2D 초음파 영상이 좋아야 3D 초음파 영상도 좋다. 즉 2D에서와 같은 이상적인 영상 획득을 위한 이미지 조절 과정(depth, sector angle, gain, compression, and time-gain compensation 등)을 동일하게 적용하여야 하며, 이후에 심초음파 기계에 있는 3D 이미징 버튼을 눌러서 실시간 Single-beat, live 3D 영상을 바로 얻을 수 있다. 다만, 3D 영상 획득에서 주의하여야 할 특이점 세 가지를 강조한다. 첫째, 환자의 호흡 조절이다. 3D 영상에서 아직도 volume per seconds (VPS)가 낮은 것이 문제가 되는 경우가 있고, 또 임상적 요구에 따라 이전과 같이 multi-beats ECG-gated full-volume을 얻어야 할 필요가 있다. 이때는 완전한 이미지가 만들어질 때까지(2-6 beats) 호흡을 멈추도록 조율하는 것이 stich artifact를 피할 수 있는 방법이다[1]. 둘째, 3D 이미징 버튼을 누르기 전, 볼륨 영상 옆에 제공되는 pre-view 영상(biplane or triplane)을 잘 보면서 좌심실 전체가 잘 포함되었는지 확인하여 drop-out artifacts (좌심실 외벽 또는 심첨부 호발)를 피해야 한다. 셋째, 기계에 따라 분석 프로그램의 특성에 맞는 이미지를 만들어야 한다. 예를 들면, EPIQ CVx (Philips)의 경우에는 심첨4방도에서 좌심방까지 포함하는 영상을 얻음으로써, 자동 분석 결과 좌심방 용적까지 동시에 얻을 수 있고(Fig. 3), ACUSON SC2000 (Siemens Healthineers)은 연속적인 세 주기의 심장의 용적을 분석할 수 있기 때문에 맥박이 규칙적인 경우는 3 beats, 심방 세동인 경우에는 5 beats 연속 영상을 얻는 것이 도움이 된다(Fig. 4).

Figure 2. Simultaneous multi-slice visualization of left ventricle short axis views from a 3D full-volume data set.

Figure 3. A fully automated LV endocardial contour tracing using the 3D HeartModel quantification (Philips Healthcare, Andover, MA, USA). LV, left ventricle; LA, left atrium; ED, end-diastole; ES, end-systole; EF, ejection fraction; SV, stroke volume.

Figure 4. A fully automated left ventricle analysis using the 3D eSie LVA quantification (Siemens Healthineers, Mountain View, CA, USA). EF, ejection fraction; EDV, end-diastolic volume; ESV, end-systolic volume; SV, stroke volume; SDI, systolic dyssynchrony index.

좌심실 기능 분석(left ventricular functional analysis)

3D 이미지는 심초음파 기계상에서 바로 분석 혹은 따로 저장하여 각 기계마다 특정한 workstation에서 분석 가능하다(HeartModel in QLAB, Philips; 4D Auto LVQ in EchoPAC workstation, GE Healthcare; eSie LVA in SC2000 workplace, Siemens Healthineers). Philips의 경우는 single-beat live 3D 영상을 골라 HMQ 버튼을 누르면 바로 fully automated 인공 지능 모델 알고리즘으로 좌심실과 좌심방 용적, 기능 분석 결과가 제시된다(Fig. 3). 물론 수동으로 전체 또는 부분적인 내경 보정이 가능하다. 내경 보정이 가능하다. GE는 single-beat live 3D 혹은 ECG gated full volume으로 4D Auto LVQ 소프트웨어를 클릭한 뒤 순서대로 따라가면 거의 자동으로(대개 two-click points로 apex와 mid-base를 이완기말, 수축기말에 수동으로 지정) 좌심실 용적, 좌심실 질량 그리고 4D Strain을 차례로 얻을 수 있는 장점이 있다(Fig. 5). Siemens는 VPS가 높아서 ECG gated imaging은 존재하지 않으며, single-beat live 3D 영상에서 eSie LVA를

one-click하면 fully automated 연속 세 심장 주기가 분석되어 각각 또는 평균값으로 계산되어 제시된다(Fig. 4). 삼사에서 제공하는 자동화된 좌심실 용적 및 기능 분석 프로그램을 통해 검사자의 숙련도와 관련 없이 수초에서 수분 이내에 원하는 결과를 얻을 수 있다. 정상 범위 해석에 있어서는 근본적으로 자동화 및 수동 분석 소프트웨어의 차이, 기계 특성에 따른 차이, 인종과 성별에 따른 차이 등을 고려하지 않을 수 없다[12-14]. 그러나 3D 기법은 적어도 같은 기계에서 동일한 소프트웨어로 동일 환자를 추적 검사할 경우 검사자 의존도가 적고 재현성이 높으며, 추적 신뢰성에 있어서 안정적이라 할 수 있다. 최종적으로 심초음파 보고서에 삼차원 심초음파로 얻어진 좌심실 용적은 체표면적으로 나누어 지수(index)로 표현하는 것이 바람직하며, 가장 최근 문헌을 통한 삼차원 초음파 정상 범위를 아래에 제시한다[15] (Table 1).

Figure 5. A semi-automated LV analysis using the 4D Auto LVQ quantification (GE Healthcare, Wauwatosa, WI, USA). LV, left ventricle; EDV, end-diastolic volume; ESV, end-systolic volume; EF, ejection fraction; HR, heart rate; SV, stroke volume; CO, cardiac output; Spl, Spherical index; EDMass, end-diastolic mass; ESMass, end-systolic mass; GPSL, global peak longitudinal strain.

Table 1. Normal values of left ventricle by three-dimensional echocardiography

EDVi (mL/m ²)		ESVi (mL/m ²)		EF (%)		Mass-index (g/m ²)	
M	F	M	F	M	F	M	F
57 ± 11 (34-80)	51 ± 9 (34-68)	22 ± 5 (12-33)	19 ± 4 (11-28)	60 ± 6 (52-68)	63 ± 4 (54-72)	70 ± 9 (52-88)	61 ± 8 (45-77)

Values are presented as mean ± standard deviation (range).

EDVi, end-diastolic volume index; ESVi, end-systolic volume index; EF, ejection fraction; M, male; F, female.

결론

현재 상용되는 3D TTE를 이용하여 임상적으로 가장 많이 적용하고 있는 분야인 좌심실 기능 분석에 대해 간단히 살펴보았다. 3D 이미징과 분석에 있어서 시간이 오래 걸리지 않고, 복잡하지 않을 수 있다는 생각의 변화가 있었다면, 이후 발전되는 3D를 따라갈 준비가 되었다고 할 수 있겠다. 3D는 이미징에 있어서는 “One-probe solution, Higher VPS (Color Doppler 포함), Single-beat consecutive imaging”으로, 분석에 있어서는 인공 지능 소프트웨어가 보다 믿을 수 있는 자동화된 알고리즘을 지향하는데, 내강을 분석하는 것뿐만 아니라 심실벽의 mechanics, flow dynamics를 분석하는 방향으로 나아갈 것으로 예상된다.

이제 소프트웨어만 있으면 쉽고 빠르게 3D 영상을 만들어 전문 심초음파로 인정받을 수 있는 시점에 서 있다. 단지 3D를 구현할 수 기계 역량이 있음이 전문 심초음파 수가 획득으로 연결되는 것이 아니라, 어떤 환자에서 삼차원 심초음파 검사가 도움이 되는지 환자의 적응증에 따른 수행 여부가 전문 심초음파 수가 결정에 고려되어야 한다는 점을 임상 의사로서 간과해서는 안 될 것이다.

중심 단어: 삼차원 심초음파; 좌심실 기능; 변형

REFERENCES

1. Yang HS, Bansal RC, Mookadam F, Khandheria BK, Tajik AJ, Chandrasekaran K. Practical guide for three-dimensional transthoracic echocardiography using a fully sampled matrix array transducer. *J Am Soc Echocardiogr* 2008;21:979-989; quiz 1081-1082.
2. Wu VC, Kitano T, Nabeshima Y, Otani K, Chu PH, Takeuchi M. Optimal threshold of three-dimensional echocardiographic fully automated software for quantification of left ventricular volumes and ejection fraction: comparison with cardiac magnetic resonance disk-area summation method and feature tracking method. *PLoS One* 2019;14:e0211154.
3. Sun L, Feng H, Ni L, Wang H, Gao D. Realization of fully automated quantification of left ventricular volumes and systolic function using transthoracic 3D echocardiography. *Cardiovasc Ultrasound* 2018;16:2.
4. Tamborini G, Piazzese C, Lang RM, et al. Feasibility and accuracy of automated software for transthoracic three-dimensional left ventricular volume and function analysis: comparisons with two-dimensional echocardiography, three-dimensional transthoracic manual method, and cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2017;30:1049-1058.
5. Zhou X, Thavendiranathan P, Chen Y, et al. Feasibility of automated three-dimensional rotational mechanics by real-time volume transthoracic echocardiography: preliminary accuracy and reproducibility data compared with cardiovascular magnetic resonance. *J Am Soc Echocardiogr* 2016;29:62-73.
6. Lang RM, Badano LP, Tsang W, et al. EAE/ASE recommendations for image acquisition and display using three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2012;25:3-46.
7. Otani K, Nakazono A, Salgo IS, Lang RM, Takeuchi M. Three-dimensional echocardiographic assessment of left heart chamber size and function with fully automated quantification software in patients with atrial fibrillation. *J Am Soc Echocardiogr* 2016;29:955-965.
8. Thavendiranathan P, Liu S, Verhaert D, et al. Feasibility, accuracy, and reproducibility of real-time full-volume 3D transthoracic echocardiography to measure LV volumes and systolic function: a fully automated endocardial contouring algorithm in sinus rhythm and atrial fibrillation. *JACC Cardiovasc Imaging* 2012;5:239-251.
9. Muraru D, Badano LP, Piccoli G, et al. Validation of a novel automated border-detection algorithm for rapid and accurate quantitation of left ventricular volumes based on three-dimensional echocardiography. *Eur J Echocardiogr* 2010;11:359-368.
10. Tsang W, Salgo IS, Medvedofsky D, et al. Transthoracic 3D echocardiographic left heart chamber quantification using an automated adaptive analytics algorithm. *JACC Cardiovasc Imaging* 2016;9:769-782.
11. Muraru D, Niero A, Rodriguez-Zanella H, Cherata D, Badano L. Three-dimensional speckle-tracking echocardiography: benefits and limitations of integrating myocardial mechanics with three-dimensional imaging. *Cardiovasc Diagn Ther* 2018;8:101-117.
12. Muraru D, Cecchetto A, Cucchini U, et al. Intervendor consistency and accuracy of left ventricular volume measurements using three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2018;31:158-168.e1.
13. Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V, et al. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2015;28:1-39.e14.
14. Bernard A, Addetia K, Dulgheru R, et al. 3D echocardiographic reference ranges for normal left ventricular volumes and strain: results from the EACVI NORRE study. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2017;18:475-483.
15. Lang RM, Addetia K, Narang A, Mor-Avi V. 3-Dimensional echocardiography: latest developments and future directions. *JACC Cardiovasc Imaging* 2018;11:1854-1878.
16. Korean Ministry of Health and Welfare. 1st, 2nd Q&A aggregate paper relevant to revision of ultrasound [Internet]. Sejong (KR): Korean Ministry of Health and Welfare, c2018 [cited 2018 May 18]. Available from: <https://www.khidi.or.kr/board/view?linkId=211099&menuId=MENU01499>.