

## 4-Dimensional Image Acquisition: Clinical Importance (Emphasis on Cardiac MDCT)

연세대학교 의과대학 영상의학과학교실

최 병 옥

### 서 론

영상의학의 획기적인 발전으로 영상 진단은 3D (3-dimensional)를 넘어서 4D (4-dimensional) 영상으로 가고 있다. 기존의 2D (2-dimensional) 정적(static) 영상에 의한 고전적인 진단 방법은 새로운 도전과 희망을 맞고 있다. 살아있는 인체의 역동적인 현상과 움직임을 표현하기 위하여 예로부터 많은 시도가 있어 왔지만 종합적인 정보를 총체적으로 또는 부분적으로 쉽게 임상에 적용할 수 있는 단계가 가시화되기 시작한 것은 MDCT (multidetector CT)의 출현 이후이다. 이 새로운 CT가 움직이는 심장에서 가장 영상화하기 까다로운 관상동맥을 보여준다고 하였을 때, 많은 사람들은 의구심을 품었을 것이다. 시간 해상능이 100 ms였던 전자선 CT (Electron Beam CT, EBCT)가 제대로 해내지 못했던 일을 겨우 시간 해상능이 250 ms 에 불과한 다검출기 CT가 해내리라고는 믿기 어려운 일이었다. 그러나 MDCT의 기술은 빠르게 발전하여, 현재 시장에 출시되고 있는 검출기가 64개인 CT는 이미 100 ms에 근접하는 시간 해상도와 조영제 주입속도를 증가하는 촬영 속도를 가지게 되었는데, 최초 등장 시 검출기가 4개였던 기종에서 8, 12, 16, 64개 검출기 CT에 이르기까지 개발 시간이 불과 6년 밖에 걸리지 않았음을 생각하면, 섬광이 스치고 지나듯 짧은 시간에 심장의 고해상도 3차원 영상을 얻고, 또 움직이는 4차원 영상을 얻어 이를 짧은 시간 안에 실시간으로 분석하는 것이 임상적으로 적용될 수 있는 날이 멀지 않은 미래를 느끼게 한다. 그러므로 본 소고의 초점을 MDCT를 이용한 4D-심장영상에 맞추고자 한다.

### 4-Dimensional Imaging: 정의

3차원 공간 정보에 시간에 의한 동적인 정보를 함께 보여주는 영상을 4D 영상으로 정의할 수 있겠다. 이런 의미에서 움직이거나, 시간에 따른 변화를 보이는 정보를 영상으로 표현하는 모든 것을 포함시킬 수 있겠으나, 이해를 쉽게 하기 위하여 범위를 좁히게 되면 인체에서 움직임이 가장 심한 심장 영상을 대표성을 띠다고 말해도 되겠다. 실제로 4D영상의 임상 적용은 심장 영상에서 가장 먼저 시도되고 있으며 그 촬영 방법은 MDCT이다.

### 4-Dimensional Imaging: 임상적용

4D imaging은 MRI, 초음파, PET, CT 등 대부분의 장비에서 시도되고 있다. 각 영상 장비의 특성에 따라 시도되는 분야 및 임상 적용이 다르다. MRI는 시간 정보를 보여 주는 동영상을 직접 촬영할 수 있고, 시간에 따른 혈류의 변화 등 기능적 요소를 영상화하는데 매우 훌륭한 장비임에 틀림없으나, 3차원적 공간 영상을 얻기에 매우 많은 시간이 소요되는 단점이 있어 실제 3차원+시간적 변화를 보기에는 적절하지 못하다. 심장영상에서는 특히 숨을 참는 동안 4차원 영상을 얻기에 아직 실용적인 방법이 등장하지 않았다. 초음파를 이용한 4D imaging은 이미 임상에 널리 이용되고 있다. Fetal 4D-imaging, 4D-imaging guided biopsy 등이 매우 각광받는 적용분야이다. 초음파의 단점은 초음파 시술자의 술기와 지식에 따라 정확도와 재현성이 달라지는 문제점을 가지고 있다. 이외에 4D imaging은 심장의 ECG 동조를 이용한 PET 영상, liver dynamic

CT, CT를 이용하여 호흡 운동을 보정하고 효과적인 radiation 치료 범위를 정하는데에도 사용되고 있다.

### 4-D Imaging: 심장영상

4D 심장영상의 개념은 점차 진화하고 있다. 4D 심장 영상의 정의는 일련의 연속적인 영상, 정적 영상, 심장 주기 영상, 3D 영상 자료들을 동영상으로 만들어 심장의 공간적 정보를 심장 주기에 따른 일련의 시간적 정보와 움직임의 관계를 보여주는 것이다. 4D 정보는 해부학적, 기능적 영상 정보를 보여주는 데 사용될 수 있으나 기존의 영상 방법과는 확연히 구분된다. 4D 심장 영상은 포괄적인 심장 CT의 개념이다.

#### 1. 심장영상 획득

1) ECG-gating: MDCT를 이용한 심장 영상의 획득에는 두 가지 ECG동조화 방법이 있다. 전향적(prospective) 동조화와 후향적(retrospective) 동조화의 방법이 있는데, 후자의방법으로만 시간적 정보를 가지는 모든 데이터를 얻을 수 있다. 후향적 동조화를 이용한 영상의 reconstruction에는 Retrospectively ECG gated reconstruction algorithm이 사용된다(Fig. 1).

2) Isovoxel의 구현: 진정한 4D imaging을 구현하기 위하여는 어느 방향으로나 똑같은 공간 해상도를 가져야 하며 작은 해부학적 구조에 대한 기능을 표현할 정도로 높은 해상도여야 한다. 따라서 가장 문제가 되는 z-axis의 해상도, 즉 detector의 폭이 xy평면의 해상도와 같아지도록 해야 한다. 최근 시장에 출시되는 64-detector CT에서는 z-축 공간 해상도가 0.33-0.4 mm로 진정한 의미의 isovoxel을 구현할 수 있게 되었다.

3) 시간 해상도: 심장의 박동 속도에 따라 달라지기는 하지만 일반적으로 심장의 움직임에 의한 인공물이 없이 촬영하기 위하여 요구되는 영상 획득 시간 해상도는 60 ms 이하라고 한다. 그러나 아직까지 이 정도의 시간 해상도를 구현하는 MDCT는 없다. 따라서 심장 박동수를 줄이고 촬영하는 것이 일반적이다. 많이 움직이면서 작은 구조물인 관상동맥을 관찰하기 위하여는 분당 65회 이하의 심박동수를 유지하는 것이 매우 중요하다. 최근 시간해상도를 높이기 위한 방법으로 segmental reconstruction을 이용하기도 하는데, 이를 이용하면 gantry rotation 속도의 절반인 120 ms정도의 시간 해상도를 구현할 수 있다.

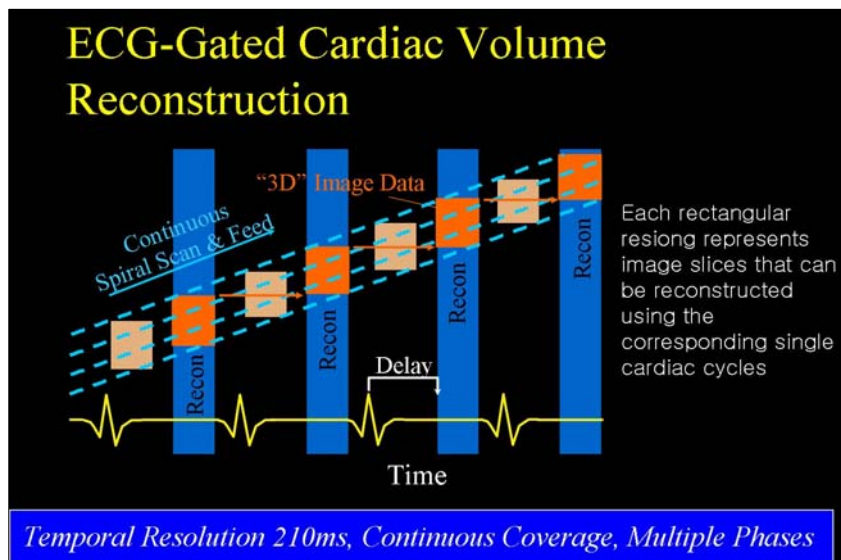


Fig. 1. Retrospectively ECG-gated reconstruction algorithm.

4) Image Reconstruction: 시간적 정보는 ECG 정보를 이용하여 영상을 만드는 것인데 하나의 심장 cycle을 등간격으로 나누어 영상을 만들게 된다. 이 때, 많은 영상을 만들수록 많은 정보가 포함되게 되며, 최소 8~9개 주기의 3D 영상 set를 만

들어 주어야 한다. MRI처럼 25개 정도의 주기로 만드는 것도 가능하나 CT의 시간 해상도 및 현재의 컴퓨터 수준을 고려하면 실용적인 대안은 아니다.

5) Image Quality 결정 요소: 좋은 영상을 만들기 위하여는 충분한 시간 해상도와 공간 해상도가 필수적이다. 현재 CT의 해상도로는 비교적 천천히 움직이는 이완기에는 해상도가 충분하지만 빨리 움직이는 수축기에는 해상도가 충분하지 않아 움직임에 의한 인공물 (motion artifact)에서 자유롭지 않다(Fig. 2). 따라서 4D영상을 보고 평가함에 있어서 목적에 따라 적절한 심장 주기를 이용하여야 한다. 영상의 질을 가장 좋게 획득하는 방법은 심장의 박동 주기를 천천히 만들어 상대적인 시간 해상도를 높이는 방법이다. 이를 위하여 베타 차단제(beta blocker)를 투여한다.

6) Radiation Dose: 기종에 따라 방사선 피폭량이 다르기는 하지만 Effective dose가 7.0 mSv~10.2 mSv (42.0 mGy) 정도로 일반적인 흉부CT 검사에 비하여 피폭량이 3배 정도 높다. 그러므로 CT를 이용한 4D imaging이 임상적으로 널리 사용되기 위하여는 분명한 이점 뿐 아니라 방사선 피폭량을 줄이기 위한 노력도 병행되어야 한다.

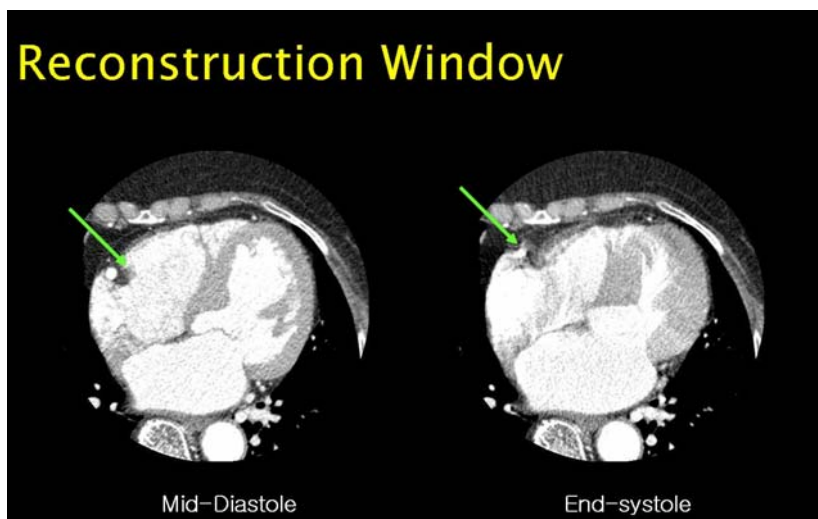


Fig. 2. 심장 주기에 따른 인공물 및 영상의 질. 이완기 (diastole)의 영상이 수축기 (systole)의 영상에 비하여 인공물이 적고 영상의 질이 우수하다.

7) Large Image Data: 후향적 동조화로 얻은 심장의 영상은 심장 주기를 세분하여 영상을 만들기 때문에 심장 주기를 많이 선택할수록 정비례하여 데이터의 용량이 늘어나게 된다. 특히 고해상도 3D 영상 정보를 가지도록 하기 위해 z-axis 해상도를 최상으로 하고, 시간적 정보량을 늘리기 위해 많은 심장 주기 영상을 만들게 되면 수 천장의 영상이 나오게 되며 이를 저장하고 다루는 것이 문제가 될 수 있다.

8) 4D imaging viewer: MDCT로 얻어진 영상을 4D 영상 데이터로 만들고 나면 이를 적절히 평가할 수 있는 viewer system이 갖추어져야 한다. 이 viewer가 갖추어야 할 요소로는 빠른 영상 재구성으로 실시간 운동을 관찰할 수 있어야 하고, 정지 및 회전, 자유로운 심장 주기 선택, 자동적인 reformat, MPR (Multiplanar reformations), MIP (Maximum intensity projection), 단면 영상으로의 자유로운 전환 등이 있다. 이러한 viewer로 심장 벽, 유두근, 심실중격, 심장 판막의 움직임은 마치 초음파처럼 실시간으로 관찰할 수 있게 되고, 혈관조영술처럼 가장 최적화된 심장 주기에 관상동맥, 관상동, 심장정맥을 관찰할 수 있게 된다(Fig. 3). 음영의 폭이나 수준, 영상의 넓이, 확대, 기울이기, 역치 값 적용, 컬러, 분절화 등을 interactive모드로 적용할 수도 있어야 한다. 임상에서 흔히 이용하는 view point를 가지는 여러 개의 영상이 실시간으로 연동되어 움직이는 화면 구성은 진단자의 능력을 배가 시킬 것이다(Fig. 4). 이런 시스템을 구현하기 위하여 매우 성능이 좋은 컴퓨터가 필요하다.

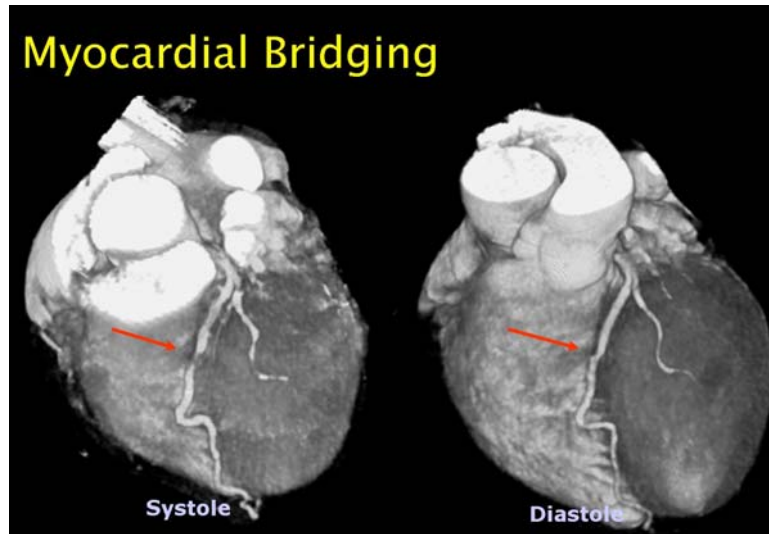


Fig. 3. Multiphase Images. 수축기(systole) 영상에서 관상동맥이 좁아지고 이완기(diastole)영상에서 다시 정상화되는 전형적인 myocardial bridging을 관찰할 수 있다.



Fig. 4. 4D imaging. Volume rendering (left) and Maximum intensity projection (right).

9) 4D 심장영상의 의학적 의미: 4D 심장 영상 CT를 가지고 해부학적, 기능적 평가가 가능하다. 심장 기능을 나타내는 여러 가지 인자들에는 좌심실과 우심실의 이완기말과 수축기말 용적, 좌심실 박출량, 좌심실 박출률, 좌심실 심근질량, 좌심실 심근두께 등이 있다. 심초음파가 이러한 심기능 인자들을 비침습적으로 쉽게 평가할 수 있기 때문에 기능적 평가만을 위하여 MDCT를 이용하는 것에는 아직 한계가 있다. 그러나 MDCT를 이용하여 후향적 심전도 동기화시켜 조영증강 관상동맥 촬영을 시행하면 관상동맥의 평가와 함께 심장의 기능 평가가 동시에 가능하다. 심초음파와는 달리 용적의 측정에서 기하학적 전제에 의존하지 않기 때문에 매우 정확한 측정이 가능하며 재현성이 높다. 하지만 다검출기 CT를 이용한 심기능의 평가는 따로 많은 영상들을 재구성해야 하므로 아직까지는 많은 시간과 인력이 소모되지만, 이 문제는 멀지 않아 해결될 것으로 전망되며 4D imaging의 주 장애물은 아니다. 그러나 아직은 심초음파나 MRI 등의 비 침습적인 방법이 불가능하거나 어려운 경우로 적응증을 한정시켜야 할 것이다. 심기능 인자의 측정에서 고려하여야 하는 것은 촬영 중 환자가 숨을 참고 있으며, 관상동맥 촬영을 위해 베타 차단제를 사용할 수 있어 측정치에 영향을 줄 수 있다는 점이다. MDCT를 이용하여 심근 관류 영상, 관상동맥예비력(coronary perfusion reserve) 검사, 지연 조영증강을 이용한 심근 생존력 평가 등이 시도되고 있으나, MDCT의 단점인 방사선 피폭량과 다른 검사에 비해 검사의 정확성 등을 고려해 보면 아직까지 실제 임상에서의 적용에는 한계가 있다. 심초음파나 MRI처럼 전반적인 혹은 국소적인 심근이나 심판막의 운동과 심장 주기에 따른

부피의 변화를 평가할 수 있다. 관상동맥 평가를 위해 적절한 심장 주기 영상을 선택하여 볼 수 있고, 심박출률을 계산할 수 있다. 경험이 쌓이면 심근허혈, 심근경색, 부정맥 등을 평가할 수도 있다.

## 결 론

심장 영상을 평가하기에 충분한 시간 해상도, 공간 해상도, 적은 인공물, 지능적 심전도 동기화 등이 심장 영상에 가장 중요한 요소들이다. 검출기가 최고 256개인 다검출기 CT의 개발, 또는 평판 검출기(flat panel detector)를 장착하여 마치 카메라와 같이 단 한 번의 회전만으로 심장을 모두 포함하여 촬영할 수 있는 신개념 CT가 개발 중이므로 관상동맥 협착 질환을 포함한 허혈성 심장 질환의 진단에서 있어서 4D-CT에 거는 기대가 크다. 256 detector MDCT와 flat-panel CT는 주기가 없거나 불규칙하게 움직이는 대상에 대하여도 다주기 영상 자료를 얻을 수 있다. 이 CT들은 5,000장 이상의 영상을 만들게 되며 이 많은 영상을 4D 영상으로 다룰 수 있으려면 더욱 빠른 시스템을 요구하게 된다. 이러한 빠른 4D viewer는 진단의 표준 기구가 될 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Ohnesorge B, Flohr T, Becker C, et al: Cardiac imaging by means of electrocardiographically gated multisection spiral CT: initial experience. *Radiology* 217:564-71 (2000)
2. Kachelriess M, Ulzheimer S, Kalender WA: ECG-correlated image reconstruction from subsecond multi-slice spiral CT scans of the heart. *Med Phys* 27:1881-902 (2000)
3. Kopp AF, Schroeder S, Kuettner A, et al: Coronary arteries: retrospectively ECG-gated multi-detector row CT angiography with selective optimization of the image reconstruction window. *Radiology* 221:683-8 (2001)
4. Hong C, Becker CR, Huber A, et al: ECG-gated reconstructed multi-detector row CT coronaryangiography: effect of varying trigger delay on image quality. *Radiology* 220:712-7 (2001)
5. Nieman K, van Ooijen P, Rensing B, Oudkerk M, de Feyter PJ: Four-dimensional cardiac imaging with multislice computed tomography. *Circulation* 103:E62 (2001)
6. Saito K, Saito M, Komatu S, Ohtomo K: Real-time four-dimensional imaging of the heart with multi-detector row CT. *Radiographics* 10:1148/rg.e8 (2002)
7. Lawler LP, Ney D, Pannu HK, Fishman EK: Four-dimensional imaging of the heart based on near-isotropic MDCT data sets. *Am J Reontgenology* 184:774-6 (2005)
8. Juergens KU, Grude M, Maintz D, et al: Multi-detector row CT of left ventricular function with dedicated analysis software versus MR imaging: initial experience. *Radiology* 230:403-10 (2004)