

# Cardiac MR Physics

울산의대 서준범

## 강의 목표

1. Cardiac MR에서 쓰이는 cardiac, respiratory 동조기법의 원리를 이해한다.
2. 형태학적 진단을 위한 심장영상기법의 기본 원리 및 지연기 조영증강 영상기법에서 inversion time 선택의 중요성을 이해한다.
3. 기능적 평가를 위한 cine Cardiac MR 및 perfusion MR 영상기법의 원리를 이해한다.

## 1. 서론

최근 들어 영상의학 영역에서 심장영상에 대한 관심이 증대하고 있는데 이는 심장 CT 및 MR 영상기법의 기술적인 진보에 도움이 크다. 심장 MR 영상의 경우는 사실 수십 년 전부터 영상기법의 연구가 있어왔으나 특히 최근 들어 고자장 MR 시스템, surface coil의 개발 및 이용, 다채널 코일 소개 및 gradient의 개선, ECG gating technique의 개선, respiratory gating 기법의 개선, short TR/TE 기법의 개발, k-space segmentation, parallel imaging, view sharing, inversion recovery gradient echo 기법을 이용한 심근경색영역의 진단 등 눈부신 발전을 거듭하여 임상적인 사용이 증대되고 있다. 그러나 비교적 MR의 physics 및 영상의 구성 원리에 익숙한 영상의학

과 의사들에게조차도 심장 MR 영상 기법은 쉽게 익히기 어려운 면이 있는데 이는 다른 부위의 영상과는 달리 심장 MR 영상이 빠른 속도로 지속적인 움직임을 보이는 장기의 평가를 형태학적인 요소뿐 아니라 동적인 요소까지 평가해야 하기 때문에 기본적인 MR physics에 더하여 독특한 요소들을 포함하고 있기 때문이다. 이에 저자는 이 원고에서 심장 MR 영상기법을 이해하는데 필요한 기초적인 요소와 환자의 상태에 따른 영상변수의 조절방법 및 이에 따른 화질의 영향을 간단히 소개하고자 한다. 임상적으로 가장 중요한 적응증인 성인의 허혈성심질환의 평가에 사용되는 영상기법들을 중심으로 설명하도록 하겠다.

## 2. 심장 MR 영상의 기본: 심장, 호흡 운동의 제어

심장을 영상화하는 데 있어서 가장 중요하고 기본이 되는 요소는 심장운동과 호흡운동이다. 이를 위해서는 생체내의 신호를 이용하여 일정한 심장 운동 혹은 호흡운동의 위상 (phase)에서 영상을 얻는 동기화 기법이 이용된다.

### (1) 심장동조 (Cardiac Synchronization): 심전도 동기화 기법

심장은 주기적으로 수축하는 장기이다. 심장의 기계적인 수축에 선행하여 전기신호의 탈분극화 (electrical depolarization)가 발생한다. 그러므로 심장의 수축에 의한 인공음영은 심장영상을 얻을 때 심장수축의 같은 시기에 영상을 얻으면 가능하다. 다시 말하면 각각의 phase encoding step을 심장주기의 같은 시기 (즉 심장주기의 한 시점을 기준으로 같은 시간 간격을 두고) 얻으면 일관되고 인공음영이 없는 영상을 얻게 되는 것이다. 통상적으로 심전도에서 R파를 기준으로 하는 경우가 많은데 그 이유는 R파가 가장 전압이 높아서 쉽게 찾을 수 있기 때문이다. 그러므로 R파의 신호를 획득하여 일정한 지연시간 (delay time)에 영상을 얻게 되면 같은 심근수축 주기에서 영상신호를 얻게 되므로 이를 합치면 실제로는 다른 심장박동에서 얻은 신호이나 정해진 심장주기의 영상을 얻게 되는 것이다. 기능적 영상을 얻기 위해서는 다양한 지연시기의 영상정보를 얻어서 각 지연시기의 신호를 합침으로서 동적인 정보를 얻게 된다. 한편 주로 해부학적인 정보가 중시되는 SE 계열의 영상이나 관상동맥 MRA 혹은 심근경색의 진단에 사용되는 지연기 조영증강 영상의 경우는 비교적 움직임이 적은 확장기 중간 혹은 말기를 이용하게 된다.

이처럼 심장영상을 위해서는 심전도 동기를 위해 R 파에 의한 전기신호를 정확히 받아내는

것이 중요하다. 그러므로 심전도 동기에서 R파의 크기가 적절한지 부정맥이 없는지 등이 중요한 고려사항이 된다. 예를 들어 심막 삼출시 QRS 전압이 낮아져서 R파를 인식하지 못하거나 P파나 T파가 높아서 (예; 심방확장, hyperkalemia) R파로 인식될 경우에는 효과적인 심전도 동기가 불가능하며 이에 따라 영상의 질이 떨어지게 된다. 또한 부정맥이 있는 경우에도 양질의 영상을 얻기 어려우며 다른 인공음영이 생기게 된다. 또한 선천성 심기형이 있는 경우는 전극을 일반적인 위치에 위치하는 경우에 문제가 생기기도 한다. 이러한 경우 전극의 위치를 바꾸거나 R파를 찾아내는 문턱 (threshold)등을 조절하는 경우가 많다. 최근 들어서는 소위 'vector cardiogram'이라는 기법이 소개되면서 보다 정확한 심전도 동기가 가능하게 되었는데 이는 간단히 설명하면 다른 방향은 심전도 신호 두개를 얻어서 잡음으로 간주되는 P, T 파를 서로 상쇄시킴으로써 R파를 보다 정확히 찾게 하는 방법이다.

심전도 신호를 이용하여 심장 동조를 하는 방법은 엄밀하게 구별하면 triggering, gating, retrospective gating이 조금씩 다른 의미를 가지고 있으나 편의상 대개 gating이라고 칭하는 경우가 많다.

## (2) 호흡 운동의 제어

호흡 운동은 심장운동과는 달리 일정정도 조절이 가능하다. 그러므로 대부분의 심장영상기법은 다양한 fast imaging technique을 이용하여 호흡을 중지한 상태에서 획득하는 경우가 많으며 대부분의 영상이 이렇게 얻어진다. 이 경우 대부분 만족스러운 화질을 얻기 위하여 한 번의 호흡 정지로 하나의 단면만을 얻는 경우가 많다. 그러나 만일 환자의 호흡곤란이 심하거나 화질 저하가 초래되고 호흡정지수준이 불규칙한 경우에는 호흡에 의한 misregistration이 발생하는 등이 문제가 있다. 따라서 가능하면 한 번의 호흡에 많은 단면을 얻어서 호흡정지의 회수를 줄이려는 노력들이 진행되며 이를 위해서는 보다 빠른 영상기법이 요구된다고 하겠다. 또한 고해상도의 영상의 요구하는 관상동맥 MR 영상 등은 어려움이 많다. 따라서 과거부터 호흡운동과의 연동을 위해 기법들이 연구되어 왔는데 흉벽의 확장정도를 압력계 등을 이용하여 모니터하는 방법은 일반적인 흉부, 상복부 영상에서는 이용이 가능하나 심장영상에서는 어려움이 있어왔다. 그러나 최근 소위 'navigator echo' 기법이 소개되면서 호흡운동 동조에 획기적인 개선이 있게 되었다(Figure 1). 이 방법은 폐와 상복부 (특히 우측 간 부위)의 MR 신호강도가 차이가 많은 것을 이용하여 우측 횡격막을 가로지르는 RF pulse를 보내서 신호강도를 얻고 이를 이용하여 횡격막의 위치를 파악하는 방법으로 이를 통하여 횡격막의 위치가 일정한 창 (window)내에 위치하는 경우에만 영상을 얻게 하는 방법이다. 대개 호흡운동이 호기 말에 일정한 레벨을 유지하고 움직임이 적은 점을 이

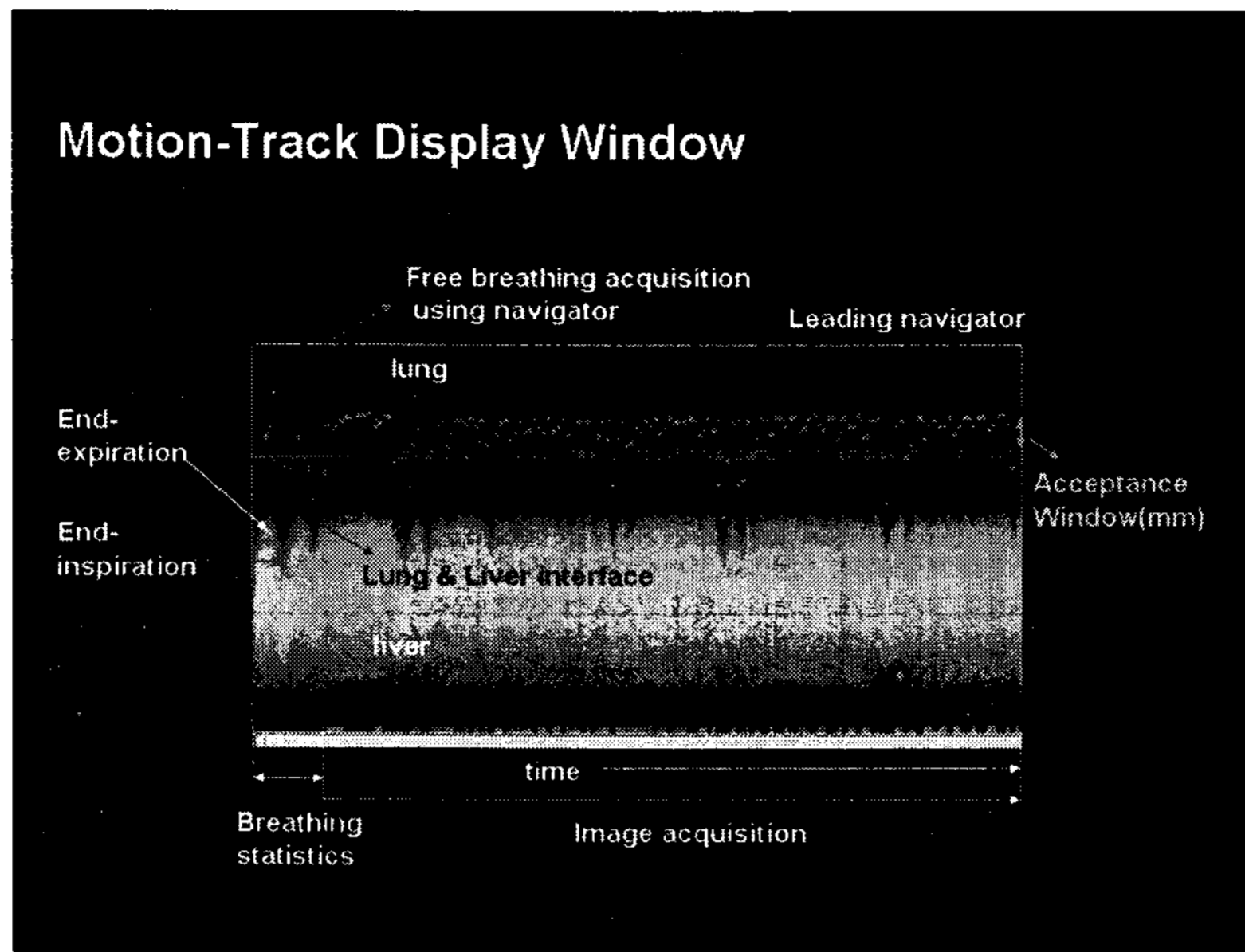


Figure 1. Navigation echo respiratory gating window의 예

용하여 호기 말에 영상을 얻는 경우가 많다. 이러한 navigator echo 기법을 이용하면 영상을 얻는 횡격막의 위치를 수mm 내로 고정함으로써 관상동맥 MRA가 가능하다. 이외에도 호흡이 매우 불량한 환자의 경우 지연기 조영증강영상 등을 얻기도 한다. 그러나 이러한 호흡운동 동기화 기법을 이용하면 어쩔 수 없이 검사시간이 길어지게 된다는 점을 고려해야 한다. 따라서 최근에는 보다 빠른 영상기법을 이용하여 호흡운동의 동조를 하지 않고 천천히 호흡을 하면서 기능적 혹은 형태학적인 영상을 얻는 소위 'real time imaging' 혹은 'MR echo' 기법을 이용하기도 한다.

### 3. 심장영상기법 1 - 형태학적 진단법

심장영상에 있어서 형태학적인 진단은 선천성 심질환이나 혹은 ARVD (arrhythmogenic right ventricular dysplasia), 심장종양, 등의 평가에 주로 이용되는 spin echo 계열의 영상기법과 허혈성 심질환 등에서 심근 가역성 혹은 생존능을 평가하기 위하여 사용되는 지연기 조영증강 영상에 코기법으로 나눌 수 있다. 또한 이에 더하여 관상동맥 MRA 기법이 있다.

#### (1) Spin echo 계열의 영상 기법

만약 임상적인 요구가 심장의 형태학적인 변화에 대한 것이라면 가장 대조 해상능(contrast

resolution)이 우수한 스핀 에코 기반 영상기법을 이용하는 것이 좋다. 그러나 전통적인 스킨에코 방법의 약점은 시간 해상능 (temporal resolution)이 떨어진다는 것이다. 한 번의 신호 획득 후 스핀을 180도 펄스를 이용하여 재위상화하는 되는 많은 시간이 걸리며 이에 따라 심장주기 내에 많은 영상을 얻는 것이 어렵다. 또한 만약 전형적인 spin echo 방식으로 한 심장주기 당 하나의 phase encoding step 만을 얻는다면 한 영상을 얻기 위해서 많은 심장박동이 필요하게 되므로 너무 많은 시간이 걸리게 되며 환자의 호흡운동을 제어할 수 없게 된다. 그러므로 이를 극복하기 위해 turbo (fast) spin echo 방법을 이용하여 한 심장주기에서 비교적 같은 시기에 해당하는 동안 여러 phase encoding step을 얻는 방법을 사용하게 된다. 따라서 주로 호흡정지 상태에서 심전도 동조하에 한 영상단면씩을 얻는 방법을 사용하게 된다. 여기서 주의할 점은 심전도 동조를 하게 되므로 TR은 임의로 결정할 수 없으며 심근1회 박동시간의 n 배로 조절할 수밖에 없다는 것이다. 이러한 영상기법은 flowing blood의 signal 이 없어지는 소위 'black blood' 영상기법에 해당한다. 그러나 실제로는 심근의 trabeculation 주변, slow flow area 등에서 신호가 발생하여 정확한 평가가 어려운 경우가 많다. 따라서 최근에는 이러한 기법에 더하여 blood signal과 fat signal을 효과적으로 없애기 위하여 double 혹은 triple inversion recovery pulse를 추가하는 방법들이 소개되고 있다. Double inversion recovery 방법은 전체 영상영역에 180도 inversion pulse를 적용한 후 영상을 얻고자 하는 평면에 다시 selective inversion pulse를 적용함으로써 blood signal을 보다 효과적으로 억제하는 방법이다. 이에 fat 을 억제하기 위한 추가적인 inversion pulse를 적용하면 triple inversion recovery sequence가 되는 것이다(Figure 2).

T1강조 영상의 경우 공간해상능이 뛰어나고 조영제 주입 후 영상에서 심근경색, 허혈 부위의

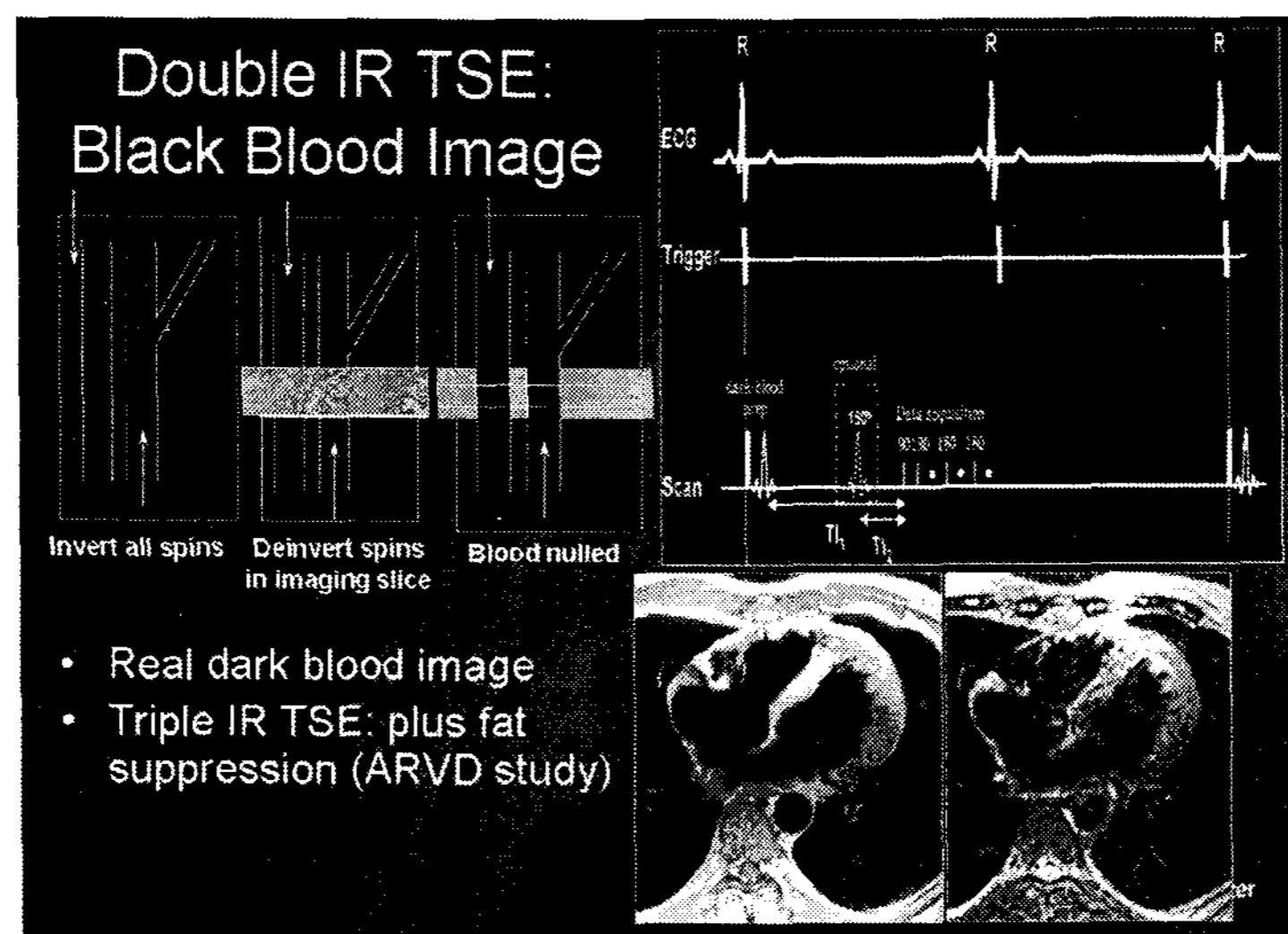


Figure 2.

신호강도가 증가한다. 반면에 이용한 T2강조 영상은 심근내 fluidity의 증가 즉 심근 부종, 심근경색, 허혈, 혹은 심근염 등의 진단에 유용하다.

## (2) 지연기 조영증강 경사에코 기법

급성심근경색의 경우 심근세포가 파괴되며 또한 동맥벽의 투과력이 증가하게 된다. 이러한 경우 조영제가 혈관 밖으로 나가게 되면 세포외공간 (extracellular space) 로 확산되게 되는데 급성 심근경색부위의 혈관이 막혀있더라도 조영제 투입후 시간이 지나게 되면 정상심근부위보다 심근세포의 파괴와 부종에 의하여 세포외공간이 많아지므로 지연기에 조영제의 상대적인 농도가 증가하게 된다. 반면에 만성심근허혈 이나 다른 원인의 섬유화의 경우에는 세포의 파괴에 의한 부종은 없으나 역시 결체조직의 침착에 의하여 정상심근부위보다 세포외공간이 증가하게 되며 이에 따라 지연기의 조영제 농도가 증가하게 된다. 따라서 이 두 경우 모두 이상 부위의 T1 relaxation time이 짧아지게 되며 T1 강조영상을 얻게 되면 고신호 강도를 얻게 되는 것이다. 따라서 이를 이용하면 심근세포의 비가역적인 손상 부위를 영상화하는 소위 'viability' 영상이 가능하다. 그러나 이러한 지연기의 심근 조영증강 현상은 심근경색부위 뿐 아니라 심근염, 심근감염, 심근병증, 심근종양, 그리고 다양한 선천성 혹은 유전성 심근질환에서도 보일 수 있다.

지연기 조영증강 경사에코기법이 소개되기 전까지는 조영증강 후 스핀에코 T1 강조영상을 얻어서 이러한 이상 심근 부위를 진단하여 왔다. 그러나 이 방법은 높은 대조해상능에도 불구하고 시간해상능의 제한에 따른 영상의 blurring으로 정확한 평가가 어려웠다. 그러나 지연기 조영증강 경사에코기법이 소개되면서 짧은 시간에 높은 공간, 시간해상능을 가진 영상이 가능해졌다. 잘 알려진 바와 같이 경사에코 기법의 문제점은 낮은 대조 해상능에 있다. 그러나 이 방법은 inversion pulse를 이용함으로써 정상 심근의 신호강도를 거의 없애고 (myocardial nulling) 이를 이용하여 대조해상능을 극대화 하게 된다 (inversion recovery prepared gradient echo 기법, Figure 3). 이 경우에 적절한 영상시기와 정상심근의 신호를 극소화하는 inversion time의 선택이 영상의 질을 결정하는 가장 중요한 변수가 된다. 즉 조영제 주입 후 정상심근의 조영제는 상당부분이 빠져나간 반면 이상심근에는 상당량의 조영제가 남아 있는 시간을 택해야 한다. 환자의 상태 즉 전반적인 심장기능, 신장기능, 조영제의 양 등에 따라 차이가 있으나 대개의 경우에는 조영제 주입후 10-20 분 정도에 영상화하는 것이 적절하다. Inversion time의 경우 과거에는 경험적으로 200-300 ms 지연시간을 결정하여 영상을 얻은 후 시간을 조절하는 방법을 사용하였으나 최근에는 한번의 호흡정지영상으로 조직의 T1 time을 측정할 수 있는 기법이 심장 영상에 적용됨으로써 (소위 'Look-Locker' 영상 혹은 Inversion time determining sequence 혹은 MR survey sequence) 손쉽

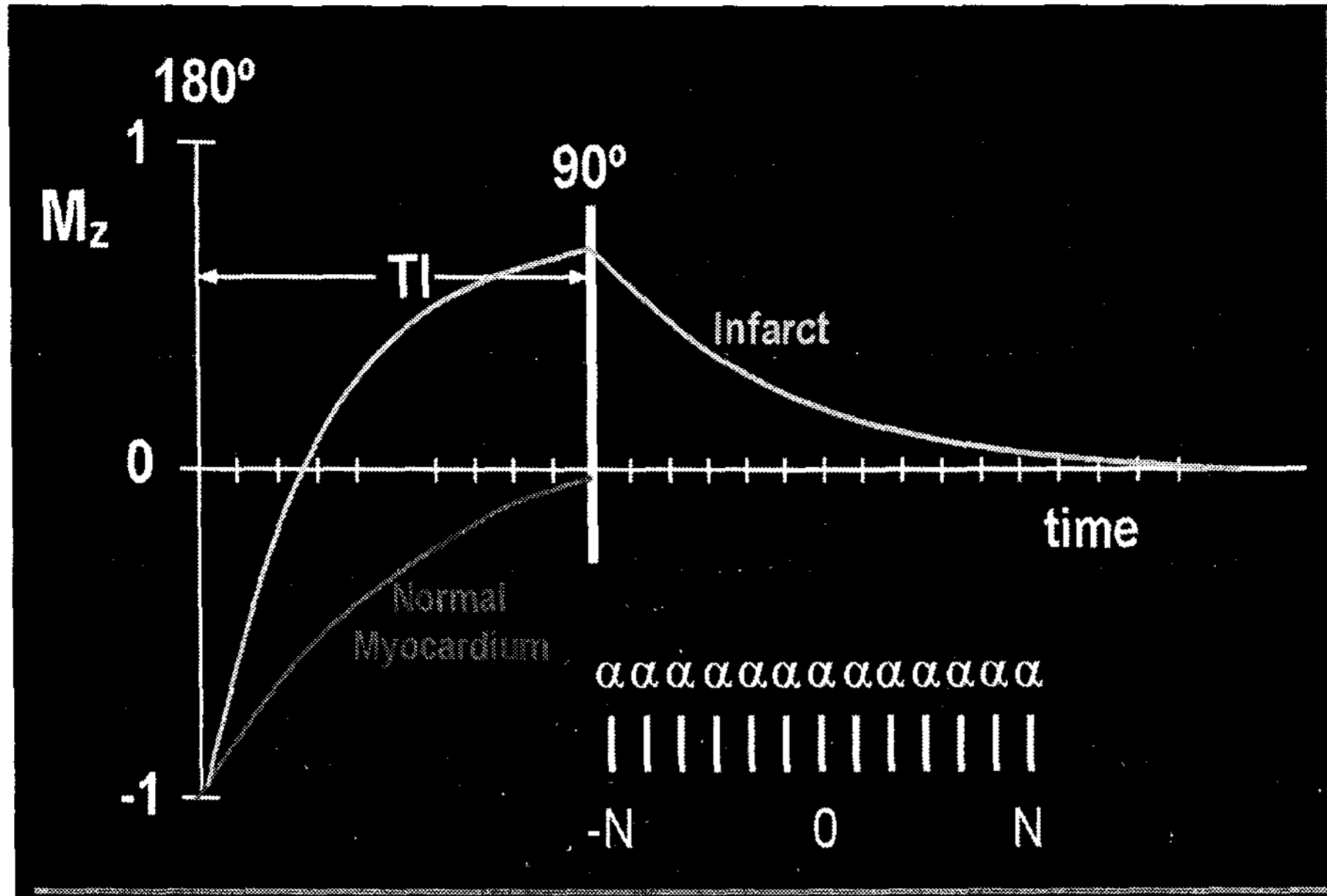


Figure 3. Inversion recovery prepared gradient echo 기법의 도해

게 시간을 결정할 수 있게 되었다. 일부 vendor에서는 이러한 inversion time을 정확하게 선택하지 않아서 영상의 후처리를 통하여 비슷한 영상을 만들어 주는 소위 'phase-sensitive' 영상기법을 소개하기도 한다.

### (3) 관상동맥 MRA

관상동맥 MRA는 심장의 움직임을 제어하면서 동시에 수mm 이내의 해상도를 가지는 영상을 얻어야 하므로 가장 어려운 분야의 하나이다. 이를 위하여 매우 빠른 경사에코기법에 기반한 영상기법을 이용한다. 또한 주변의 심낭지방의 신호를 억제하고 (fat saturation), 대조도를 증가시키는 (T2 preparation pulse) 등의 다양한 기법들이 동원된다. 크기 2D 혹은 3D 기법으로 나누어 볼 수 있는데 2D 기법은 호흡정지 중에 영상을 얻어서 영상의 질은 우수하나 영상평면 밖으로 주행하는 관상동맥의 다양한 분지들을 놓칠 수 있다는 단점이 있고 3D 기법은 영상시간이 길다는 단점이 있다. 최근에는 위에서 소개된 navigator echo 기법을 이용하여 호흡운동 동조를 비교적 우수하게 수행할 수 있게 되어 관상동맥 CT와 비슷하게 전체심장 영상을 얻는 방법들이 소개되고 있다. 양질의 관상동맥 영상을 얻는 데는 영상획득시기의 선택, 즉 관상동맥의 움직임을 가장 적은 심장주기로 delay time을 정하는 것이 가장 중요하다. 따라서 관상동맥 영상을 얻기 전에 높은 시간해상도를 가지는 cine 영상을 얻고 관상동맥 (주로 우 관상동맥의 중간분절)의 움직임을 없는 지연시간을 측정 한 후에 지연시간과 영상획득 기간을 결정하는 것이 좋다. 최근 들어서 가장 주

목을 받는 영상기법은 3D, respiratory gated, balanced SSFP based GRE technique with parallel imaging 이다.

## 4. 심장영상기법 2 - 기능적 진단법

심장 영상에서 심장 기능의 평가를 위한 기법은 크게 심근의 수축능과 움직임을 평가하는 심장영화 영상기법 (cardiac cine 기법)과 심근의 관류능을 평가하는 심근관류영상기법 (myocardial perfusion 기법), 그리고 대혈관 등의 혈류량을 측정하는 소위 속도표시 영화영상기법 (Velocity encoded cine MR, VENC 기법) 이 있다.

### (1) Cardiac Cine 기법

경사각이 작은 (Short flip angle) 경사에코방법을 이용하면 시간 해상력 (temporal resolution) 을 증가시켜 심장이 일회 수축하는 동안 여러 영상을 얻어 cine영상을 만들어 내며, 이에 따라 심실수축능이나 판막 협착이나 역류, 그리고 선천성 심질환의 이상혈행 (abnormal hemodynamics) 를 평가할 수 있게 되었다. 이때 사용되는 방법은 기기에 따라 다르지만 turbo FLASH (fast low angle shot), GRASS (fast gradient recalled acquisition in the steady state), SPGR (fast spoiled gradient echo) 기법 등이 있다. 이때 얻을 수 있는 심장주기의 숫자는 반복시간 (repetition time, TR)과 심장박동수에 따라 결정되게 된다. 그러나 이 방법 역시 한 심장주기에 하나의 phase encoding step만을 얻게 된다면 많은 시간이 걸리게 된다. 그러므로 k-space segmentation을 적용하여 한 심장주기에서 다수의 영상데이터를 받아서 k-space 를 채움으로써 한번의 호흡정지의 한 영상 단면의 cine 영상을 얻는 방법이 사용된다 (k-space segmented gradient echo sequence).

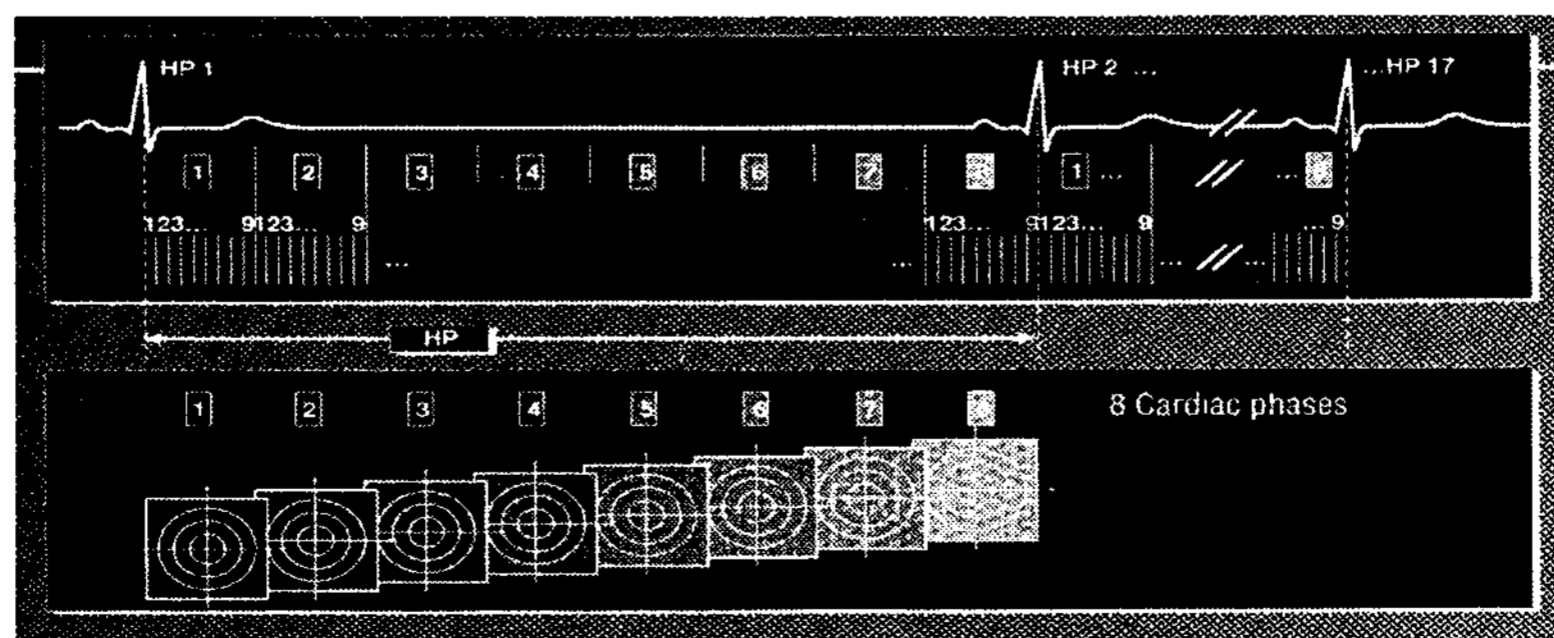


Figure 4. K-space segmentation imaging의 개념도



이 방법을 이용하면 한번의 호흡정지로 한 단면의 각 심장주기의 영상을 모두 얻게 된다 (Figure 4).

최근에는 기존에 사용된 spoiled 경사예코기법이 아닌 balanced SSFP (steady-state free precession) 기법을 기반한 경사예코 기법을 사용하고 있는 데 이를 이용하면 신호대 잡음비가 현저히 증가하여 영상의 질이 개선되며 특히 심근 수축능 등을 자동으로 평가하기 위한 소프트웨어의 정확도를 높여주므로 매우 유용하여 주로 이 방법을 이용하고 있다. 또한 이 영상은 T2/T1의 비에 따른 신호강도를 보이는 독특한 특징을 보이게 된다(Figure 5).

심근 운동을 평가하기 위한 영상기법에서 심전도 동조기법은 매우 중요한데 이는 영상획득 중 부정맥 혹은 심박수의 변화에 따른 인공음영이나 화질의 저하를 줄이는 데 매우 중요하기 때문이다. 최근에는 과거의 prospective gating기법과는 달리 coronary CTA에서와 비슷하게 retrospective gating 기법이 도입되었는데 이를 이용하면 과거에 심전도 신호를 획득하기 위해 확장기 말 영상을 얻지 못하였던 한계를 극복하고, 영상획득 중에 심박수의 변화에 따라 다른 심장 주기에 영상내에 포함되는 것을 막을 수 있기 때문이다. 또한 R-R 주기가 일정 수준을 벗어나는 경우 이를 부정맥으로 간주하고 영상데이터에서 제외하는 소위 'arrhythmia rejection' 기능도 소개되어 영상의 질을 높이고 있다.

심장 영화영상 기법에 있어서 최근에 소개된 또 다른 기술적인 개선은 소위 'view sharing 혹은 echo sharing' 기법의 도입이다. 이는 일정부분의 영상데이터를 인접한 심장주기에 해당하는 k-space에 공유함으로써 획득할 수 있는 영상주기의 수를 늘리는 방법이다. 이는 각 영상의 실질적인 시간해상능은 개선되지 않으나 영화영상에서 심장박동 당 영상 (Frame) 의 수가 증가되는

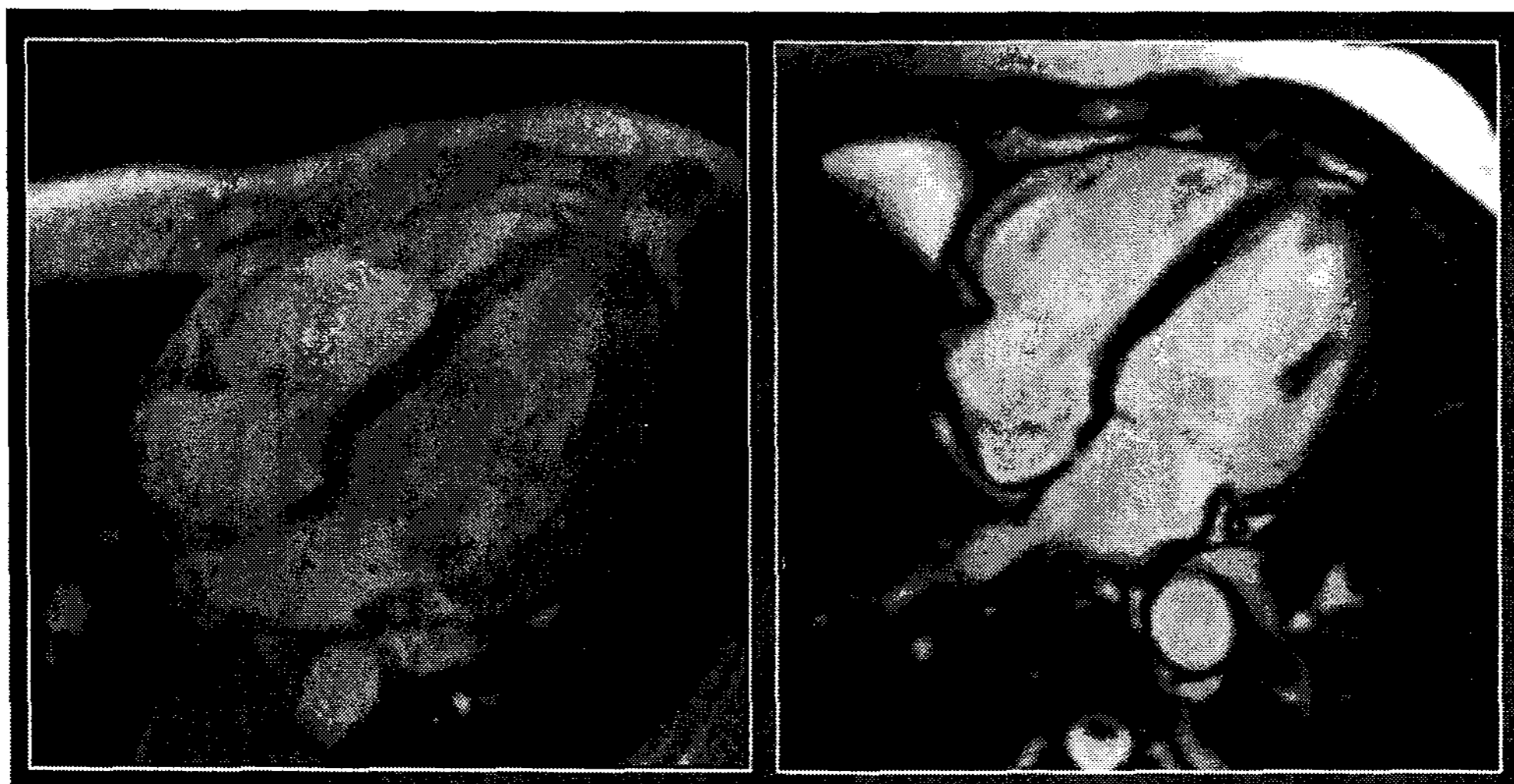


Figure 5. Spoiled GRE 영상(좌측)과 SSFP GRE(우측)의 비교.

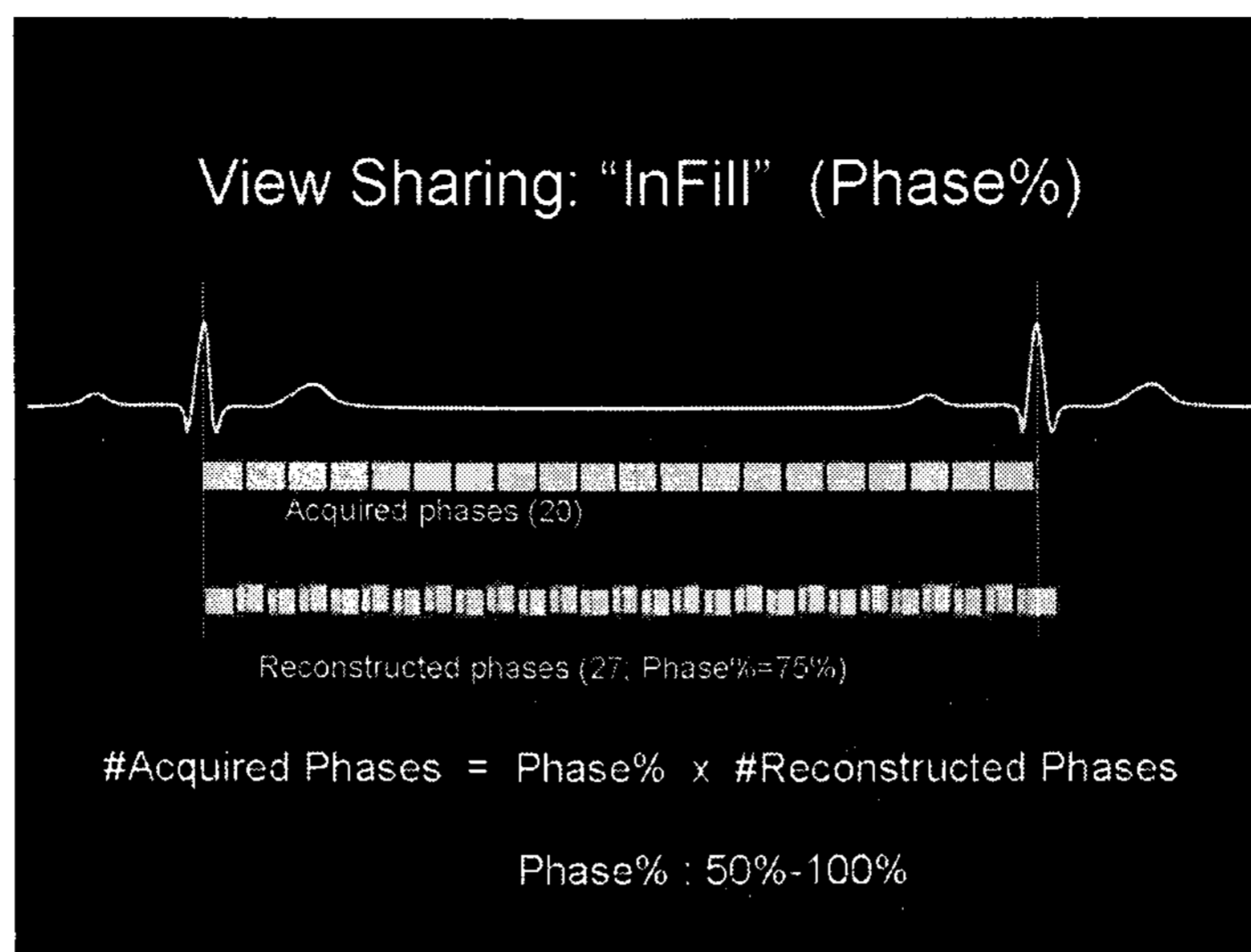


Figure 6. View sharing 기법의 개념도

효과를 낳아서 심장의 움직임을 보다 부드럽게 표현하게 되며 이에 따라 진단능이 개선되는 효과를 낳는다(Figure 6).

이외에도 고화질의 영상을 보다 빠른 시간에 얻기 위한 다양한 기법들이 동원되고 있는데 parallel imaging technique이나 half-Fourier acquisition 등의 기법이 대표적이다. 따라서 환자의 호흡상태와 연관자 하는 진단적인 영상의 질 등을 고려하여 다양한 변수들을 조정할 수 있는 능력이 필요하다. 최근에는 이러한 급속영상기법을 이용하여 심전도 동조 없이 실시간으로 영상을 분석하는 real time imaging 기법이 가능해 졌다.

\* myocardial tagging: 심근의 일부를 미리 포화시킨 후 (presaturation) cine 영상을 얻는 방법으로 심실벽의 국소적인 운동을 추적할 수 있으므로 매우 유용한 방법이다. 이 방법을 사용하면 short-axis 영상에서의 심근이 심실의 중심으로 움직이는 것 뿐 아니라 수축시에 동시에 발생하는 쥐어짜는 운동 (torsion, wringing) 및 long-axis 방향의 수축 등을 모두 평가할 수 있다. MR tag들은 heart의 T1 relaxation에 따라 신호강도가 감소하므로 매 수축시마다 tagging pulse를 주어야 한다.

## (2) Myocardial perfusion 기법

최초 순환 심근관류영상 (first-pass myocardial perfusion image): 조영제를 bolus로 주입한후 경색이 의심되는 심근부위에 매우 빠른 속도로 동일부위의 영상을 계속적으로 얻음으로써 심근내로의 조영제의 1차 통과상태를 관찰하는 방법으로 허혈손상이 있는 심근부위는 혈액의 관류가 저

하됨으로 정상심근과 구별할 수 있다. 이러한 변화는 time-intensity curve를 얻으면 객관적으로 나타낼 수 있다. 이러한 심근 관류영상은 1회 혹은 2회의 심근 수축기 중에 3-10개 이상의 영상을 얻어야 하므로 fast imaging technique이 매우 중요하다. 그러므로 경사에코기법에 더하여 echo planar 영상기법이나 혹은 parallel imaging technique을 병합하는 기법을 사용한다.

### (3) 혈류측정 영상기법

Velocity-encoded cine(VENC) 기법을 이용한다. 이 기법은 소위 phase contrast 영상 기법에 기반한 방법인데 이에 심전도 동조기법을 이용하여 cine 영상을 얻게 되며 심장주기에 따른 혈류량의 변화를 측정하게 되는 방법이다. 두 번의 영상을 얻게 되는데 처음에는 혈류에 따른 phase의 변화가 없는 영상을 얻고(motion compensated), 이후 phase change를 계산할 수 있는 영상(velocity-sensitized)을 얻게 된다. 혈류의 속도는 두 영상을 감산(subtraction)함으로써 얻어진다. 정확한 혈류의 계산을 위해서는 최대 혈류속도(encoding velocity)를 적절하게 지정하는 것이 필수적이다. 이를 너무 낮게 지정하게 되면 수위 aliasing이 발생하게 되며 이를 너무 높게 잡으면 정확도가 낮아진다. 대개 한 심장주기 내에 25 phase 이상의 영상을 얻는 것이 좋은 것으로 알려져 있으며 공간해상능도 너무 떨어뜨리지 않는 것이 좋다. 또한 혈류의 방향에 수직으로 영상의 평면을 잡아야만 정확한 측정이 가능하다.

## 추천참고문헌

1. Boxt LM. Cardiac MR imaging: A guide for the beginner. RadioGraphics 1999;19:1009-1025
  2. Reeder SB, et al. Advanced cardiac MR imaging of ischemic heart disease. RadioGraphics 2001;21:1047-1074
  3. Earls JP, et al. Cardiac MRI: Recent progress and continued challenges. J Magn Reson Imaging 2002;16:111-127
  4. Lotz J, et al. Cardiovascular flow measurement with phase-contrast MR imaging: Basic facts and implementation. RadioGraphics 2002;22:651-671
  5. Vogel-Claussen J, et al. Delayed enhancement MR imaging: Utility in myocardial assessment. RadioGraphics 2006;26:795-810
  6. Finn JP, et al. Cardiac MR imaging: State of the technology. Radiology 2006;241:338-354
- \* 적극 권장: 참고문헌 3, 6