

Taxonomy of Pulse Sequences

서울대학교병원 송인찬

강의 목표

1. 신호 발생 및 처리, k -space 습득방식, 그리고 영상대조도를 기반으로 한 측정기법들의 계통적 분류에 따른 종합적인 이해.
2. 각 기기회사에 따른 측정기법 명칭 차이 이해.

1. 도입

자기공명영상은 각종 인체 질환에 대한 매우 뛰어난 해부학적 영상 및 생리학적 정보를 제공해주는 도구로서 진단 의학적 측면에서 그 역할이 매우 크다고 볼 수가 있다. 지난 30년의 역사를 통하여 등장한 각종 종류의 자기공명영상들은 소프트웨어 및 하드웨어의 기술적 발달에 따라 그 의미에 따라 새로운 이름을 얻을 수가 있었다. 측정기법은 모두 시간적 해상력과 공간분해력의 증가, 대조도의 향상을 위하여 새로이 개발되었다. 측정기법들은 각 기기회사에 따라 동일한 물리적 기반을 하고 있더라도 그 명칭이 다르고 약자를 사용하기 때문에 측정기법의 명칭으로만 그 의미를 정확히 파악하기가 어렵다. 본 원고의 목적은 상호 밀접히 연관되어 있지만 다양한 이름으로 불리는 측정기법들이 가지고 있는 공통적 특성과 차이점에 대한 정보를 기반으로 이를

종합적으로 이해하고자 함에 도움이 되고자 한다.

자기공명영상기법에 사용되고 있는 다양한 측정방법을 분류학적으로 일목요연하게 구분 정리하는 것은 매우 어렵고 복잡한 작업이다. 다른 영상기기와는 달리 그 영상습득원리에 해당되는 물리학적 기반이 다양하기 때문이다. 자기공명영상은 물체의 대조도를 대표하는 신호 발생 원리 및 영상구성알고리즘에 해당하는 신호처리기법 등 물리학적, 공학적 다양한 측면이 반영되어 발달되어 왔기 때문에 하나의 기준으로 그 많은 측정기법을 분류하여 설명한다는 것이 사실상 어렵다. 그러나, 본 원고에서는 신호발생 및 처리와 k space 습득방식 그리고 영상 대조도의 기준으로 자기공명영상 측정기법을 분류하고 설명하고자 한다.

2. 측정기법의 분류

(1) 신호발생 및 처리 기준

신호발생 및 처리를 기준으로 자기공명영상 측정기법을 분류하는 것은 자기공명영상신호 발생근원의 기본 단위인 스핀을 다루는 측정기법의 물리적 기반을 고려하는 것과 동일하다. 모든 자기공명영상 측정기법은 기본적 신호 발생 측면에서 보면 이에 귀속될 수가 있다. 영상신호인 RF (radiofrequency) 신호는 RF 펄스를 가한 후 바로 FID (free induction decay) 신호를 얻을 수가 있으나 자기공명영상기법은 영상 구성 원리상 주파수와 위상에 대한 정보를 얻기 위하여 일정한 시간적 공간을 필요로 한다. 이를 위해 고안된 것으로서 RF 펄스와 경사자계를 이용한 spin echo와 gradient echo 두 가지 방법을 크게 들 수가 있다. RF 펄스를 사용하는 것은 두 개의 RF 펄스 (90,180)를 사용하여 신호를 발생시킨다. 위치 정보를 위해 두개의 RF 펄스에 의해 생긴 시간적 공간 사이에 위상경사자계를 넣어둔다. RF 펄스는 자화상태 (magnetization)의 방향을 변화시키어 신호를 만들어 낸다. 그래서 RF 펄스에 의한 spin의 변화를 통하여 반향신호를 얻기 때문에 이를 spin echo 기법 (SE) 이라 불린다. 이에 반해 서로 반대방향의 경사자계를 가함으로써 자화상태의 precession의 방향을 변화시키어 반향 신호를 만들어 내는 gradient echo 기법 (GRE; gradient-recalled echo, FE; field echo)을 들 수가 있다. 이 두 기법은 신호발생을 기반으로 하여 모든 다양한 자기공명영상 측정기법의 영상 대조도를 결정하는 아주 기본적 측정기법이라 할 수가 있다. Gradient echo기법은 두 개의 RF 펄스를 사용하는 spin echo기법에 비해 측정시간이 짧기 때문에 기존 spin echo 기법으로는 영상 습득이 어려운 복부 및 심장 영상에 많이

사용되고 있고 영상기법상 측정시간이 길어지는 3D 영상기법에 사용된다. 그러나, gradient echo 기법은 자기장의 균일도에 영향을 spin echo기법보다 크게 받기 때문에 susceptibility 효과가 있는 영역에서 공간적 왜곡과 신호유실 등을 초래할 수가 있다. 반면에 spin echo기법은 자기장의 불균일도에 강한 기법으로 비교적 모든 인체 기관에서 공간적 왜곡이 없는 영상을 제공한다.

Spin echo를 기반으로 하는 측정기법은 신호 습득 측면에서 하나의 180도 RF 펄스로 하나의 에코신호를 사용하는 것과 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill)기법과 같이 다수의 180도 RF 펄스를 사용하여 다수의 에코신호를 습득하는 방식으로 나누어 볼 수가 있다. 다수의 180도 RF 펄스의 사용은 위치정보를 위한 위상자계의 효율적인 사용으로 측정시간을 단축할 수 있는 데 한번의 TR에 여러 개의 RF 펄스를 사용하고 이들 사이에 존재하는 공간에 다수의 위상코딩 경사자계를 가하는 기법으로 RARE (rapid acquisition with relaxation enhancement, fast spin echo, turbo spin echo)기법과 HASTE (half-fourier-acquired single-shot turbo spin echo, SS-FSE; single shot fast spin echo, FSE-ADA; fast spin echo asymmetric data allocation with half scan)기법 등을 들 수가 있다. RARE 기법은 측정시간의 단축으로 3D T2강조영상기법에 사용되고 있다. 특히, HASTE기법은 한번의 TR (repetition time)에 영상습득에 필요한 모든 위치 위상자계를 가해야 하기 때문에 상당히 긴 시간까지 신호를 받아야 한다. 그러므로 상당한 T2 감쇄 (decay)로 인하여 짧은 T2의 물질에 대한 신호는 관찰되지 않고 주로 긴 T2를 가진 물질의 영상화하는 데에 그 응용이 제한되어 있어 현재 MRCP (magnetic resonance cholangio-pancreatography) 영상 기법으로 사용되고 있다. Spin echo기법에서 90도 RF 펄스의 앞에 inversion pulse인 180도 RF 펄스를 추가적으로 사용한 inversion recovery 기법 (IR)은 특정 물질 완화시간 T1을 이용하여 그 물질의 대조도 향상을 위하여 사용된다. 이 기법은 180도 IR RF 펄스와 90도 RF 펄스간의 시간 간격으로 다른 spin echo 기법보다 장시간의 측정시간이 소요된다. 이에 측정시간의 단축을 위하여 주로 fast spin echo 기법 (TurboIR, IR-TSE; IR turbo spin echo, FSEIR; fast spin echo inversion recovery, Fast IR, TIR; turbo inversion recovery)과 함께 사용된다. IR 기법은 inversion time(TI) 를 적절히 조절하여 지방 (STIR; short inversion recovery)이나 척수액 (FLAIR; fluid-attenuated inversion recovery) 등 특정한 물질의 신호를 억제하는 기법으로 사용되고 있다.

고식적 Gradient echo기법은 신호를 습득한 후 남아있는 자화상태 ($M_{x,y}$)의 처리에 따라 spoiled gradient echo 와 unspoiled gradient echo기법으로 나뉘어진다. Spoiled gradient echo기법 (FLASH; fast low angle shot, T1-FFE; T1-weighted fast field echo, SPGR; spoiled gradient echo, T1-FFE; T1-weighted fast field echo)은 RF 펄스와 경사자계를 사용하여 신호 습득 후

남아있는 자화상태를 제거함으로써 fast T1 강조영상을 제공하고 짧은 TR의 사용으로 인한 측정 시간이 짧아져 3D 영상 및 호흡정지의 2D영상을 얻는 데 사용된다. 한편, 측정시간을 줄이기 위하여 작은 숙임각 (flip angle)의 RF 펄스들을 매우 짧은 간격으로 반복적으로 사용하는 이 기법은 신호감도가 매우 떨어지게 되는 데 이에 대한 해결책으로 180도 RF펄스를 영상 습득 전인 준비단계에서 가하는 방법 (TurboFLASH, TFE; turbo field echo, Fast SPGR, RSSG; RF spoiled steady state acquisition with rewind gradient echo, T1-FFE; fast field echo)이 개발되었다. 이는 180도 RF 펄스의 사용으로 fast T1 강조영상에 사용되고 있고 특히, 이는 2D 기법과는 달리 하나의 TR 에 180도 RF 펄스가 매번 사용되는 3D 영상기법 (MP-RAGE; magnetization-prepared rapid acquisition gradient echo, 3D TFE, 3D fast SPGR, 3D RSSG, 3D FFE)으로 확장되어 사용되었다. Unspoiled gradient echo기법은 신호를 습득한 후 남아있는 자화 상태 ($M_{x,y}$)가 다음 신호 습득시 그 크기에 반영되는 데, 보통 SSFP (steady state free precession)방법이라고 한다. Gradient echo기법의 경우, 180도 RF펄스가 사용되지 않기 때문에 TR을 크게 줄일 수가 있어 RF 펄스간의 측정간격이 매우 짧아진다. 이러한 일정한 간격으로 가해진 RF 펄스들은 두 가지 형태의 신호를 발생시킨다. 즉, 모든 RF 펄스가 가한 직후의 FID 형태와 세 번째의 RF펄스 이후에 발생하는 echo 형태의 신호를 들 수가 있다. 그러므로 습득 신호 형태에 따라 FID와 SE를 이용한 두가지 방법으로 나누어진다. FID를 사용한 기법(FISP; fast imaging with steady-state precession, GRASS; gradient-recalled acquisition in the steady state, FFE; fast field echo, SARGE; steady-state acquisition with rewind gradient echo)은 영상대조도에 있어 $T1/T2^*$ 에 의해 영향을 받는다. 짧은 TR로 인하여 측정시간이 짧아져 3D영상기법에 사용되고 있다. 그러나, 이 방법은 물분자의 흐름에 영향을 받아 척수액과 관련된 뇌나 경추 (cervical spine)영상에 사용되지는 않는다. Echo를 사용하는 SSFP 기법 (PSIF; mirrored FISP, CE-FFE-T2 (contrast-enhanced T2-weighted FFE, CE-GRASS; contrast-enhanced gradient-recalled-echo in the steady state, TRSG; time-reverse SARGE)은 FID 를 사용하는 SSFP기법과는 달리 T2 강조영상을 제공하여 뇌척수액 (cerebrospinal fluid) 영상에 사용된다. 그러나, 신호 감도가 크지 않은 문제점을 가지고 있다. 한편, SSFP 기법을 기반으로 단면선택, 주파수, 위상 코딩을 위한 세 개의 경사자계에 의해 발생하는 자화상태의 위상상태를 "0"으로 만드는 기법이 있다. 이 방법은 echo를 사용하는 SSFP기법의 단점인 낮은 신호감도를 해결하기 위해 개발되었고 영상대조도가 $T2/T1$ 에 의해 결정된다. FID와 Echo 를 사용하는 SSFP 기법들은 각각의 문제점을 보여주고 있어 이를 해결한 다양한 기법들 (DESS; Dual-echo in the steady state, CISS; constructive interference in the steady state, FIESTA-C; fast imaging with steady-state

acquisition and phase cycling) 이 있다.

(2) k-space 습득방식 기준

측정시간을 기반으로 한 자기공명영상 측정기법 분류는 k space 의 특성을 기반으로 한 데이터 습득방식과 연관되어 있다. k-space 의 특성을 기반으로 한 데이터 습득방식에 대한 이해는 특히, 현재 광범위하게 사용되고 고속영상기법을 이해하는 데 필수적이다. 자기공명영상에서 측정시간의 단축은 호흡 및 심장 운동으로 인하여 비교적 긴 측정시간의 초창기 자기공명영상측정기법으로는 가능하지 않은 복부 및 심장 영역을 포함한 전신촬영을 가능하기 위한 측정기법 발달에 있어서 매우 중요한 개념이다. 측정시간의 측면에서 자기공명영상측정기법들은 한번의 TR 기간에 하나의 k-space 의 line를 얻는 일반적 영상기법과 한번의 TR 기간 동안 다수의 RF 펄스들을 사용함으로써 여러 개의 k-space 의 line들을 얻는 고속영상기법 (turbo, fast, rapid) 그리고 한번의 TR 기간 동안 모든 k-space 영역을 얻는 초고속영상기법 (single shot, ultrafast) 세단계로 나누어 볼 수가 있다. 자기공명영상에 대한 기본적 영상처리 원리로서 물체의 공간적 분포와 자기공명영상신호는 푸리에변환 관계로 표현되고 위 관계로부터 유도된 k-space는 측정기법에 사용된 주파수와 위상 코딩 경사자계의 형태에 따라 결정된다. 이에 따라 기본적으로 특정 matrix의 영상을 얻기 위해서는 모든 자기공명영상 측정기법들은 그 matrix 수만큼의 변화되는 위상자계를 순차적으로 그 크기를 변화시켜 가해야 한다. 보통 고식적 방법으로 한번의 TR 기간 동안 하나의 k-space line를 습득한다 (SE, GRE). 그러나, 고속영상기법 (FSE, TSE)의 경우, 한번의 TR 기간 동안 여러 개의 180도 RF pulse를 순차적으로 사용하면 RF 펄스 사이에 여러 개의 echo들을 얻을 수가 있는 데 이들 echo 앞에 위치정보를 위한 위상경사자계를 놓으므로 여러 line의 k-space영역을 얻게 되어 측정 시간을 줄일 수가 있다. 또한, k-space 영역 데이터의 Hermitian symmetry 특성을 이용하여 한번의 TR기간 동안 영상 matrix 수의 반에 해당되는 최소한 RF 펄스들을 가하여 일부 영역의 데이터만을 습득함으로써 측정시간을 수초 이내로 줄일 수 있는 가능성을 열어놓았다 (HASTE, SSFSE). 이에 반하여 초고속영상기법인 EPI (echo planar imaging) 기법은 한번의 TR 기간 동안 spin echo나 gradient echo를 통하여 신호를 생성한 후 RF펄스를 사용하지 않고 gradient echo기법과 동일하게 경사자계의 스위칭을 통하여 전체의 k-space영역을 측정할 수 있어 수백ms안에 영상 습득이 가능하다. 그러나, 이 기법은 매우 짧은 RF 펄스간의 간격과 고속의 데이터 습득을 위하여 고성능 경사자계 시스템과 고속의 A/D (analog to digital) 데이터 변환 장치를 필요로 한다. 초고속영상기법은 매우 짧은 측정시간을 제공해 주는 반면 낮은 공간적 해상력을 보여주고 있어 해부적 영상보다는 높은 시간적 해상력이 필요한 뇌관류영상,

확산강조영상, 뇌기능적 영상 정보를 얻는 데 사용되고 있다. 최근에는 EPI 기법과는 달리 높은 성능의 자기공명영상장치에 의존하지 않고 측정시간을 단축할 수 있는 새로운 parallel영상 기법이 등장하였다. 데이터수집 전용 다채널 코일을 사용하여 각 채널의 공간적 신호 감도 차이를 이용한 parallel imaging 기법은 측정시간을 줄이기 위하여 전체 k-space 영역 중 선택적으로 위상경사자계의 line들을 번갈아 혹은 3, 4번씩 건너뛰어 측정한 데이터 (undersampled data)로부터 얻은 여러 개의 alias된 영상과 코일의 공간적 신호 감도 영상인 calibration 데이터를 사용하여 행렬계산식에 따라 완전한 영상을 복원한다. 이 기법은 측정시간을 단축하기 위하여 모든 측정영상기법에 적용이 가능하고 데이터 수집방식에 따라 다양하게 사용되고 있지만 크게 영상 복원에 필요한 사전데이터로서 영상데이터(SENSE; sensitivity-encoded)와 영상처리전 데이터 (SMASH; simultaneous acquisition of spatial harmonics) 사용 여부에 따라 나누어진다. 일부 k-space 영역만으로 영상을 만들 수 있는 자기공명영상특성과 결합된 3D parallel imaging 기법 (VIBE; Volumetric Interpolated Breath-hold Examination, LAVA; Liver Acquisition with Volume Acceleration, THRIVE; T1 High Resolution Isotropic Volume Examination)은 높은 공간적 해상력과 빠른 시간적 해상력이 필요한 복부영역에서 매우 유용하게 사용되고 있다.

(3) 영상대조도 기준

공간적과 시간적 해상력의 향상 측면보다는 인체 조직의 생리학적 현상과 연관된 자기공명영상신호의 변화를 이용하여 새로운 영상 대조도를 보여주는 다양한 측정방법들은 습득 방식에 있어서는 위에서 언급한 spin echo나 gradient echo 기법들을 기반으로 하고 있다. 물분자의 세포내 미시적운동인 확산운동을 반영하는 확산강조기법과 혈액의 흐름을 반영하는 MRA (MR angiography) 기법들을 들 수가 있다. 확산강조영상기법은 미시적 움직임을 관찰하기 때문에 spin-echo 기법을 기반으로 하는 초고속영상기법인 EPI 측정방법을 기반으로 개발되었고 gradient echo 기법을 바탕으로 한 MRA 기법은 혈류에 의한 자화상태의 위상정보의 변화를 이용한 것 (PC: phase contrast)과 단면영상에서의 혈류에 따른 신호의 변화를 이용한 (TOF; time of flight) 두가지 방법이 있다. 또한, 물분자의 세포내의 상태 즉 거대분자인 단백질과의 결합상태를 반영하는 MT (magnetization transfer) 기법이 있다. 보통 spin echo 기법을 기반으로 한 MT 기법은 MRA기법에서 혈류 주변 신호 억제를 통한 혈관대조도 향상에 사용된다.

3. 결론

본 원고는 현재 임상영역에서 사용되고 있는 주요 자기공명영상측정기법들을 포괄하여 이들을 위에서 언급한 세 가지 기준으로 적절하게 분류하여 계통적 상호 연관성을 파악하려고 하였다. 위에서 언급되지 않은 다양한 자기공명영상 측정기법들도 위 세 가지 기준인 신호 습득 측면의 물리적 기반과 k-space 습득방식 그리고 영상 대조도에 따라 분류될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Bushong SC. Magnetic resonance imaging; physical and biological principles 3rd Ed.2003
2. Gerard E. Boyle, Mary Ahern, BRad, Jennie Cooke, Niall P. Sheehy and James F. Meaney. An Interactive Taxonomy of MR Imaging Sequences. RadioGraphics 2006;26:e24
3. Haacke EM, Brown RW, Thompson MR, Venkatesan R. Magnetic resonance imaging; physical principles and sequence design. 1999