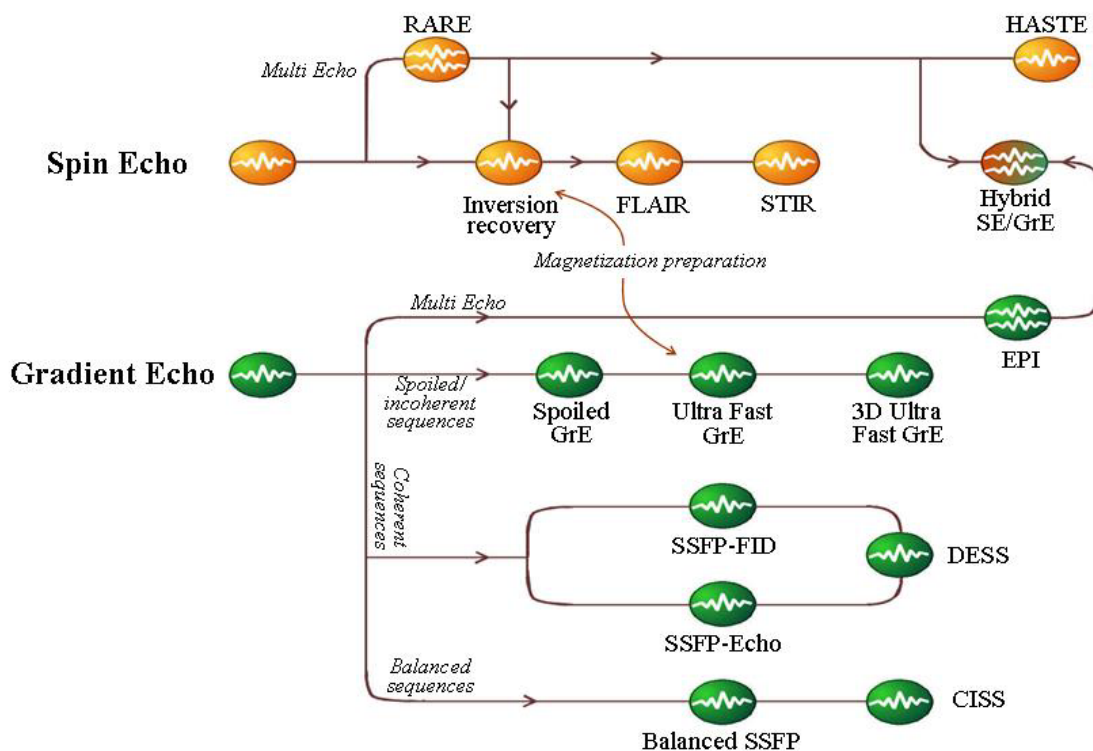


Taxonomy of Pulse Sequences in Body MRI

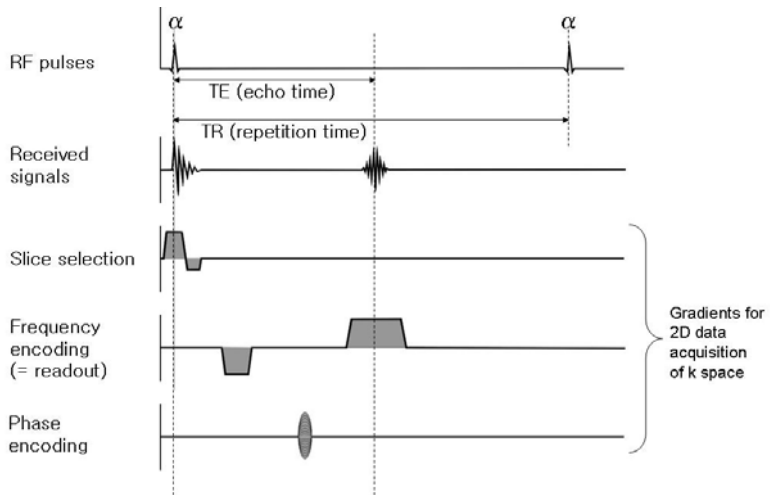
연세의대 영동세브란스병원 영상의학과 유정식

- 배경
 - MRI의 hardware적, software적 발전에 따라 MRI sequence들은 매우 종류가 다양해졌으며 개발자에 따라 각각 비슷하거나 다른 이름으로 불리우고 있다.
 - 각각의 sequence들은 고유의 물리학적 특성을 가지며 영상의 목적에 따라 다르게 이용된다.
- 강의의 목적
 - 현재 임상에서 쓰고 있는 MRI sequence들을 기본 물리학적 특성에 따라 분류하고 복부영상 특히 간영상을 중심으로 그 적용실례를 복습한다.



1. Gradient Echo (경사에코)

- Synonyms
 - *Gradient-Recalled Echo (GRE): Siemens*
 - *Gradient echo: Hitachi*
 - *Field echo: GE, Philips, Toshiba*



- Sequence의 구조와 특성
- 90° 이하의 작은 자극펄스 후 readout gradient로 dephasing lobe과 rephasing lobe을 순차적으로 적용하여 echo를 얻는 가장 단순한 구조이다.
- 경사에코에서는 180° pulse가 없으므로 magnetic field의 영향을 그대로 받아들여 T2가

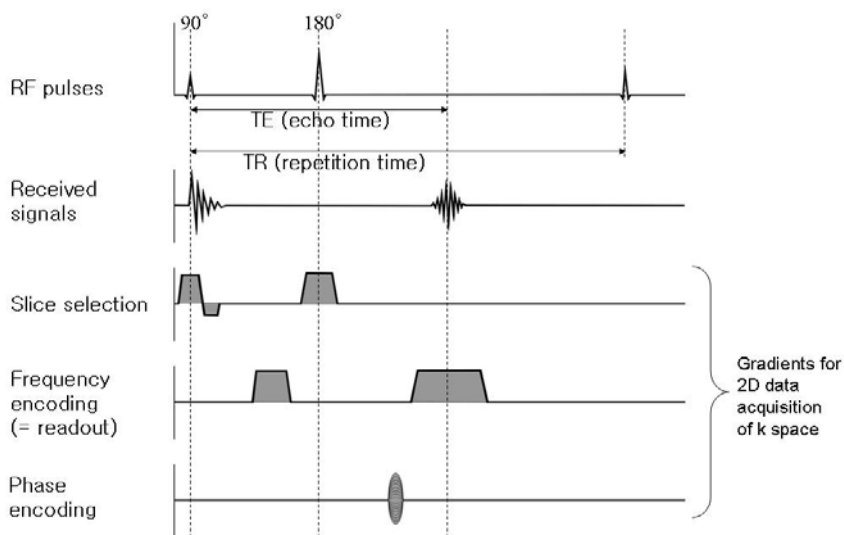
아닌 T2* curve로 신호감쇄가 일어난다.

- TR을 매우 짧게 할 수 있어 영상속도가 매우 빠르므로 3차원 영상에도 이용된다.

- 단점
 - 총자장이나 국소자장불균일에 매우 민감하여 signal이 떨어진다. 특히 tissue/air boundary나 metal implant등에서 아예 signal void로 나타날 수 있다.

2. Spin Echo (스핀에코)

- Sequence의 구조
 - 90° 자극펄스 후 180° refocusing 펄스를 준다.
 - 자극펄스 후 dephasing된 transverse magnetization은 180°펄스에 의해 data를 read out하는 TE (echo time)에 맞춰 재집중된다.

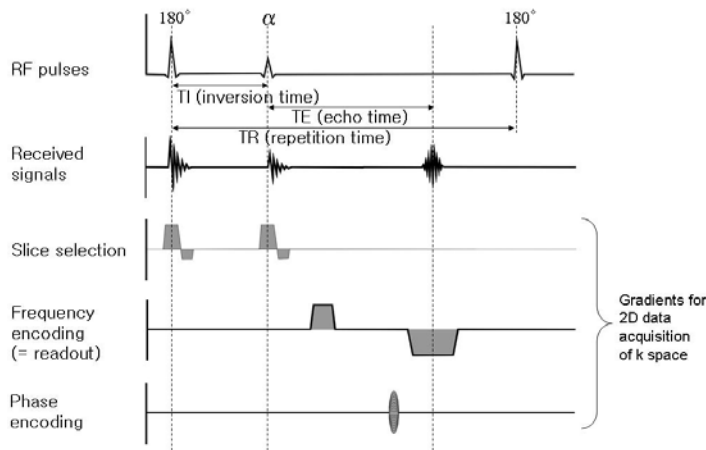


- 특성과 장점: 재집중펄스에 의해 자장이나 자극펄스, 영상경사의 불완전성에 의한 신호의 상실을 극복할 수 있는 가장 기본적인 강력한 펄스대열. (Less sensitive to magnetic susceptibility artifact)

- T1, T2, proton-density 강조영상들을 TR과 TE의 조절만으로 쉽게 얻을 수 있다.

- 단점
 - 하나의 TR기간동안 k space의 line하나를 채울 수 있을 뿐
 - ➔ 고식적인 스핀에코기법은 영상획득시간(TR [수백~수천 msec] x phase encoding 방향의 matrix수 [128 ~ 256])이 너무 길어 호흡 등의 움직임이 심한 복부영상에서는 모두 고속스핀에코기법으로 대체되었다.

3. Inversion Recovery (IR, 반전회복)

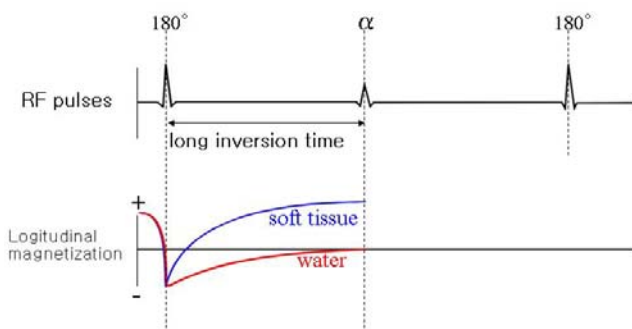


정의: 180° 준비펄스를 먼저 주고 일정한 반전시간(inversion time)이 지나 본격적인 자극펄스를 가하는 펄스대열들의 통칭.

- 특성
 - 180° 펄스 후 반전시간동안 종자화(longitudinal magnetization)의 회복된 정도에 따라 signal intensity가 달라지므로 IR 기법의 tissue contrast는 반전시간과 조직 고유의 T1 relaxation time에 달려있다.

- 단점
 - 영상의 목적에 맞는 충분한 반전시간이 각각의 TR내에 포함되어야 하므로 TR이 길어져 전체적인 영상획득시간이 길어진다.

● FLAIR (Fluid-Attenuated Inversion Recovery)



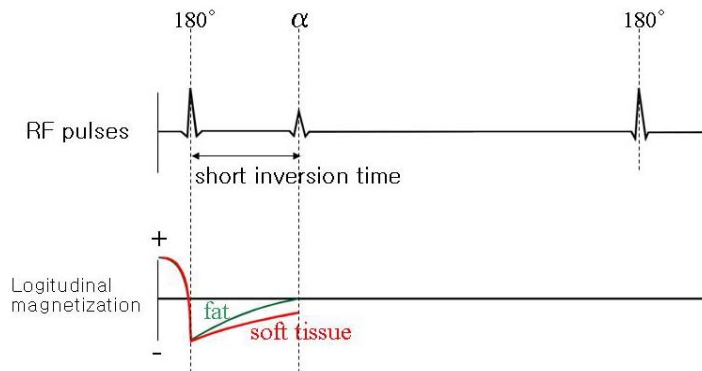
- 정의: 180° 준비펄스 후 긴 inversion time (2초 가량) 을 써서 fluid의 magnetization이 zero에 가까워 졌을 때 본격적인 RF pulse를 가하여 fluid의 signal을 suppress시키는 IR기법의 일종.

- 특성
 - T2강조영상에서 fluid는 매우 bright해 보이기 때문에 상대적으로 미약한 신호강도를 보이는 주변의 병소를 알아차리기 어려운 경우들이 있다. FLAIR기법으로 fluid의 signal을 억제하면 brain

MRI에서 ventricle 주변의 미세한 병소들을 찾아내는데 도움이 된다.

- 같은 원리로 liver에서는 최근 SPIO-enhanced T2강조영상에서 cyst의 signal을 억제하여 작은 전이암등의 발견을 돕기 위해 시도되고 있다.
- 반전시간이 워낙 길기 때문에 fluid를 제외한 soft tissue들은 대부분 magnetization을 회복한 상태로 나타난다.
- 영상시간을 절약하기 위해 주로 multi echo기법에 적용한다.

● STIR (Short Tau [T1] Inversion Recovery)



- 정의: 180° 준비펄스 후 짧은 inversion time (150ms 가량) 을 써서 fat의 magnetization이 zero에 가까워 졌을 때 본격적인 RF pulse를 가하여 fat의 signal을 suppress시키는 IR기법의 일종.

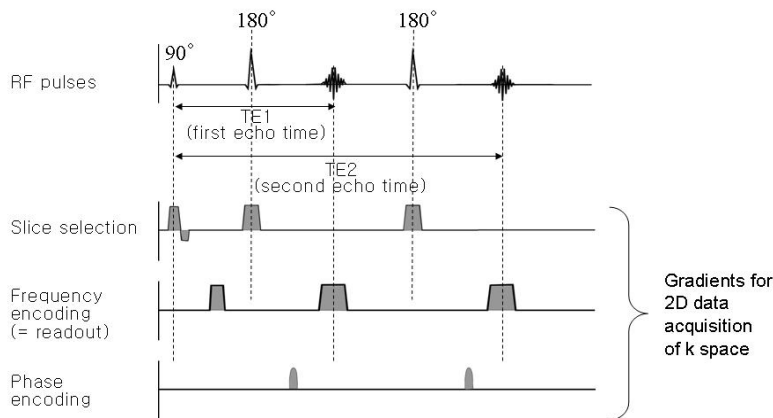
• 특성 및 장점

- T1w imaging과 함께 특히 fat signal이 매우 bright한 multi echo T2강조영상에서 주로 이용한다.
- spectral fat suppression에 비해 자장의 불균일이나 magnetic susceptibility에 덜 민감하여 더욱 효과적인 지방억제가 가능하다.

• 단점

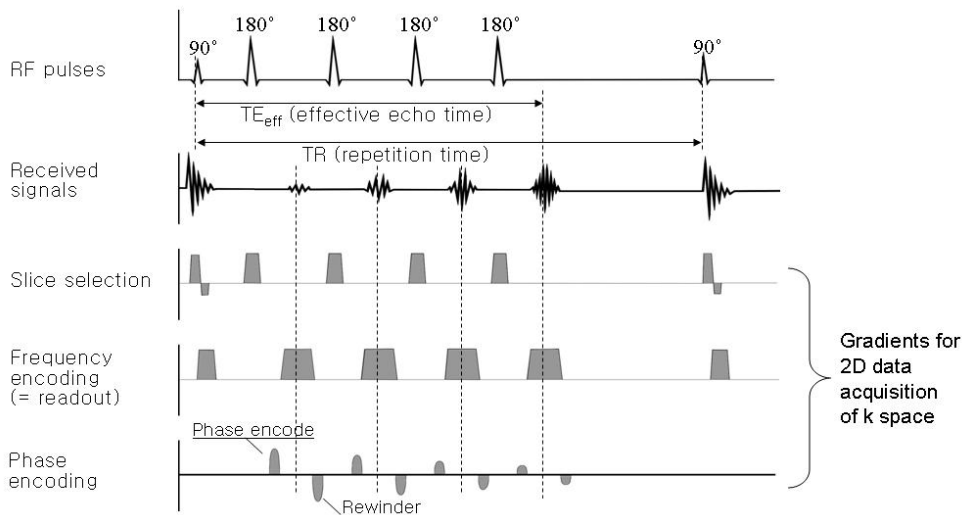
- 여전히 영상시간이 길다. (그러나 multi echo기법에 적용하면 inversion pulse수가 줄어들어 효율성이 높아진다.)
- T1이 fat과 비슷한 다른 조직 역시 suppression이 되기 때문에 contrast enhanced imaging에는 쓸 수가 없다.
- Inversion time이 짧기 때문에 soft tissue의 역전된 종축방향의 magnetization이 회복될 시간이 모자라기 때문에 T1 contrast의 reversal이 나타난다.

4. Double Spin Echo



정의: 90° 자극펄스 후에 180° 반전펄스를 2회 도입하여 TE가 다른 2개의 스핀에코영상을 얻는다. 예를 들어 별도의 시간을 들이지 않고 TE가 짧은 proton density강조영상과 TE가 긴 T2강조영상을 동시에 얻을 수 있다.

5. RARE (Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement)



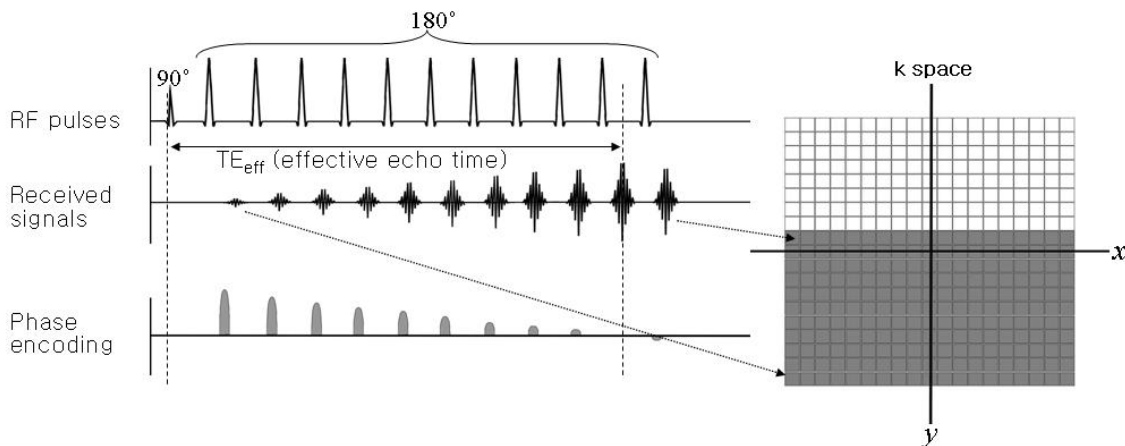
- **Synonyms**
 - *Turbo Spin Echo (TSE): Siemens, Philips*
 - *Fast Spin Echo (FSE): GE, Toshiba, Hitachi*
- **정의:** 앞 선 이중에코 펄스대열의 변형으로서 90° 자극펄스 후에 180° 재집중펄스를 수회 도입하여 (예, echo train length [ETL] = 4) 얻어진 여러개의 에코들은 하나의 k space를 채우는데 이용된다.
- **특성**
 - 고석적 스핀에코기법을 기반으로 refocusing pulse를 여러 개 써서 하나의 TR동안 k space의 여러 line을 채우는 방법이다. 불균일한 자장이나 susceptibility artifact의 영향이 적은 스핀에코의 특성을 지니면서 ETL의 길이에 비례하여 영상속도가 빠르므로 복부영상에서도 호흡정지 급속영상기법으로 널리

이용되고 있다.

- Fat의 signal이 매우 높다 (180° 재집중 펄스간격이 좁아 고식적 스피네코에서와 같이 fat의 다양한 양자환경에 의한 “J coupling”의 영향으로 fat의 signal이 떨어질 시간이 없다)
- “ TE_{eff} (effective TE)” : 순차적인 TE에서 얻은 echo들로 k space를 채워나가게 되는데 k space의 center line (phase gradient가 작아 가장 signal의 진폭이 큰 부위로서 tissue contrast에 가장 큰 영향을 미치는 line)의 data를 얻는 순간의 TE를 말한다.
- 180° 재집중 펄스간격이 좁기 때문에 phase encoding gradient마다 readout후에는 반대방향의 “rewinder” gradient를 더하여 바로바로 zero상태로 되돌려 줘야 다음 펄스에 영향을 미치지 않는다.

- 단점
 - Artifact가 많다: blurring, edge enhancement, ghosts
 - 강한 180° pulse들을 짧은 시간에 가하는 만큼 인체에 대한 specific absorption rate (SAR)가 증가한다.

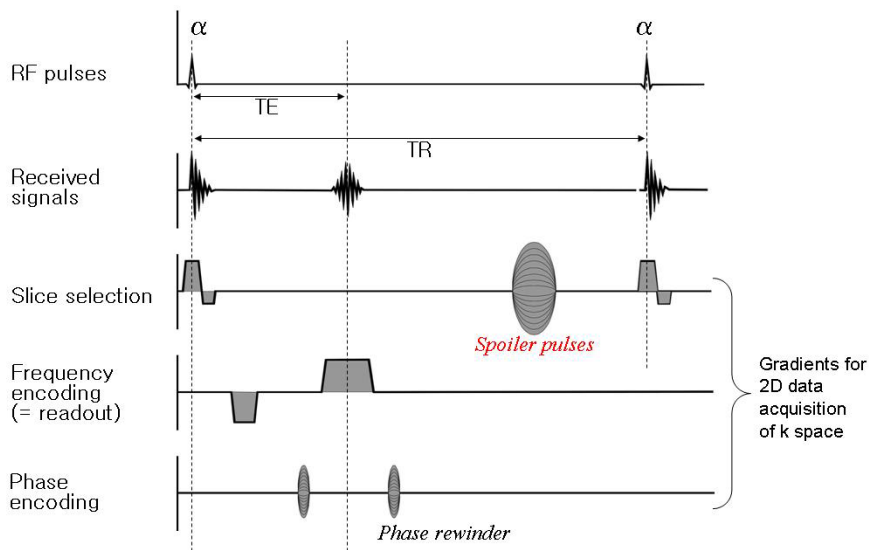
6. HASTE (Half-Fourier-Acquired Single-Shot Turbo Spin Echo)



- Synonyms
 - *HASTE*: Siemens
 - *SS-FSE (Single-Shot Fast Spin Echo)*: GE, Philips
- 정의
 - 1회의 RF pulse후 180° pulse만을 반복하여 해당 slice의 영상을 만들며 ETL이 극단적으로 길어진 RARE의 개념이다.
 - 영상시간을 더 줄이기 위해 k space (symmetric한 공간)의 $\frac{1}{2}$ 만 채우고 나머지는 기왕에 얻은 data를 추론(infer)해서 채운다 (In practice, a little more than half [about 60%] of k space is filled to correct for some errors in the data).
- 특성

- 한 slice의 관점에서 TR이 무한대가 되므로 TR에 의해 결정되는 T1효과가 완전히 배제된 순수한 T2영상을 얻게 된다.
 - ETL이 매우 길기 때문에 결국 T2가 긴 fluid만 signal이 남고 나머지 soft tissue의 signal은 매우 떨어진다 (as in MRCP, MR urography).
 - 1초 이내에 한 slice의 영상화가 가능하다 (breath-holding이 잘 되지 않는 환자에서 복부의 RARE를 보완할 목적으로도 쓰인다).
- 단점
 - Blurring artifact and limited resolution (RARE에 비해 심할 수 있으나 motion에 의한 ghost artifact는 거의 없다).

7. Spoiled Gradient Echo



- Synonyms
 - FLASH (Fast Low-Angle SHot): Siemens
 - SPGR (SPoiled GRAdient echo): GE
 - T1-FFE (T1-weighted Fast Field Echo): Philips

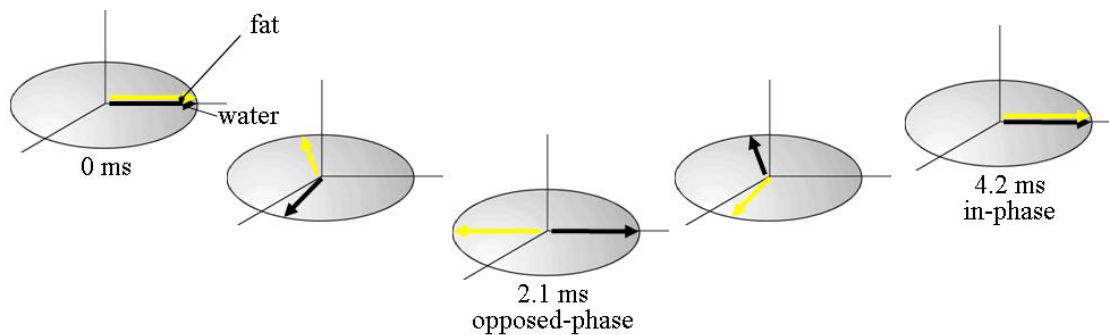
- 정의
 - 단순한 경사에코 펄스대열에서 각각의 TR이 새로 시작되기 전에 이전의 자극에 의해 남아있는 magnetization을 모두 별도의 gradient나 RF pulse를 이용한 "spoil(훔손)" 과정을 통해 제거하는 기법이다.
 - 이런 과정을 통해 각각의 RF pulse는 이전 pulse의 영향없이 longitudinal magnetization에 독자적으로 기여하여 질 좋은 T1강조영상을 만든다.
- 특성
 - Steady state (항정상태): RF pulse를 수 회 반복하다 보면 longitudinal magnetization은 일정한 상태로 유지되게 되며 그 상태의 크기는 flip angle과 TR에 따라 다르다.
 - TR이 일정할 때 어느 조직이 가장 강한 signal을 낼 수 있는 flip angle을 "Ernst angle"이라 한다. T1이 짧은 조직은 긴 조직에 비해 Ernst angle이

크다.

- TR이 짧아 liver를 포함한 abdomen MRI에서 호흡정지 T1강조영상으로 널리 적용되고 있다. 급속영상이므로 조영제 주입 후에 혈관내 혈류를 bright하게 나타내는 MR arteriography나 multiphasic dynamic imaging이 가능하다.
- 경사에코이므로 susceptibiliy effect에 매우 민감하며 artifact의 원인이 되기도 하지만 출혈부위의 평가나 T2*강조 SPIO-enhanced imaging등에서 유용하게 쓰인다.

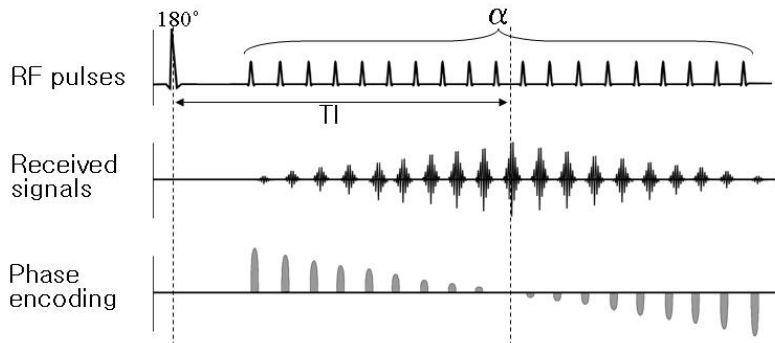
- “Chemical Shift(화학전위)” 효과

- fat과 water분자내의 proton들은 precession속도에 차이(~220 Hz at 1.5 T)가 있으며 두 종류 proton들의 vector는 세차운동중에 같은 방향을 가리키는 “in-phase”와 반대방향을 가리키는 “opposed-phase”를 주기적으로 만나게 된다. (참고: 스피네코 영상에서는 180° 재집중펄스에 의해 vector의 회전방향이 다시 되돌려지므로 이런 현상이 없다)



- 이러한 효과를 이용하여 FLASH sequence에서 TE를 2가지(2.1 ms for opposed-phase and 4.2 msec for in-phase at 1.5 T)로 달리하여 영상을 얻게되면...
 - opposed-phase영상에서 fat과 water가 섞여있는 부위는 signal이 매우 민감하게 떨어지며 주로 water proton으로 이루어진 복부장기와 omental-mesenteric fat의 경계면에서는 “intravoxel cancellation” 으로 장기가 검은테두리로 둘러싸여 보이게 된다.
- Microscopic fat을 함유한 병소들(예: fat containing focal liver lesions, adrenal adenoma, renal angiomyolipoma, etc..)을 진단하거나 지방간(fatty liver)의 정도를 파악하는데 유용하다.
- SINOP (simultaneous in-phase and opposed-phase)은 FLASH에 double echo technique을 도입하여 추가시간 없이 동일한 slice level을 갖는 두 set의 phase contrast영상을 제공해 주므로 활용도가 크다.

8. Ultrafast Gradient Echo



- *Synonyms*
 - *TurboFLASH*: Siemens
 - *Fast SPGR*: GE
 - *TFE (Turbo Field Echo)*: Philips

- 정의 및 배경

- 1초 이내에 한 단면의 영상을 얻는 초고속 경사예코열.
- TR과 TE가 매우 짧은 상태에서 SNR을 유지한 영상을 얻으려면 flip angle이 작아져야만 한다 (참조: Ernst angle).
- 이 때 충분한 T1 contrast를 얻기 위해서는 먼저 180° 준비 pulse를 준 후 반복적인 경사예코 pulse들을 주면서 T1 contrast가 최적화된 시점 (TI = inversion time) 에 맞춰 k space의 중앙값을 얻도록 sequence를 짠다.

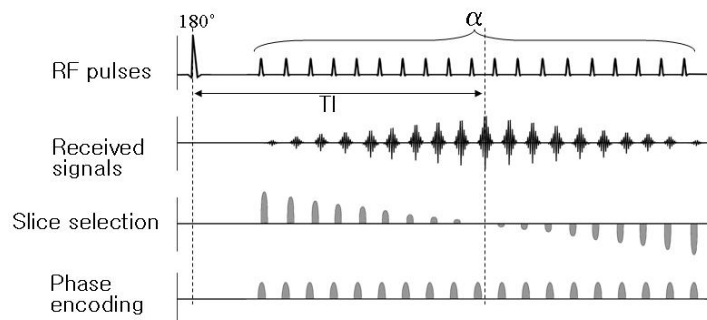
- 특성

- 180° pulse이후 회복되는 longitudinal magnetization의 정도(T1 contrast)만이 영상에 반영되며 반복적인 낮은 flip angle의 RF pulse들의 회복효과는 무시된다.
- 1초 이내에 영상이 가능하기 때문에 일종의 실시간 투시영상이 가능하다. 특히 dynamic imaging에서의 arterial phase의 촬영시점을 정할 때(timing examination) 초고속 한단면 영상을 이용하여 정맥을 통해 들어온 조영제가 aorta에 나타나는 시간을 실시간으로 파악하는데 유용하다.

- 단점

- 다중시기 dynamic imaging에도 적용이 가능하지만 FLASH에 비해 SNR이 낮다.

9. 3D Ultrafast Gradient Echo



- *Synonyms*
 - *MP-RAGE (Magnetization-Prepared Rapid Acquisition Gradient Echo)*: Siemens
 - *3D fast SPGR (SPoiled Gradient-Recalled acquisition in the steady state)*: GE

- *3D TFE (Turbo Field Echo): Philips*

• 정의 및 배경

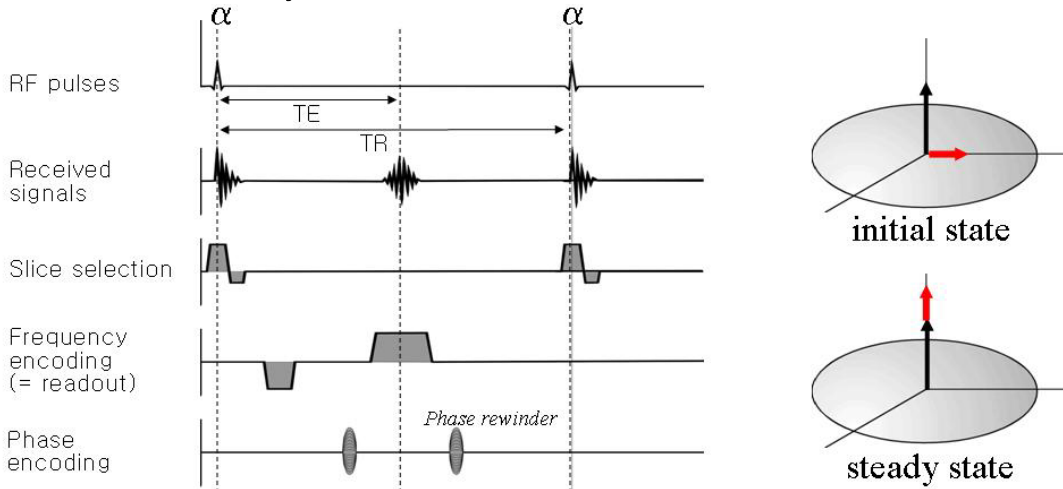
- 초고속 경사예코기법의 3D version.
- 2D와 마찬가지로 준비펄스를 이용하여 T1강조영상을 얻는다.
- 1회의 준비펄스로 slice encoding방향의 k space의 line들을 채우고 잔여 magnetization이 사라진 후 다시 준비펄스를 반복하면서 phase encoding direction을 따라 data를 채워나가는 형태로 한 partition (3차원 k space) 전체의 data를 수집한다.

• 특성

- 빠른 고해상도의 T1강조영상을 얻기 위한 기법으로서 처음에는 brain영상을 얻는데에 수분이 걸렸다.
- 현재 liver의 다중시기 dynamic imaging을 위해 일반적으로 쓰고 있는 VIBE (Volume Interpolated Breath-hold Examination)등의 sequence는 이 기법의 응용이며 영상속도가 더 빨라져서 1회의 호흡정지로 3D imaging이 가능해 졌다.

10. Unspoiled Gradient Echo Sequences

◆ SSFP-FID (Steady State Free Precession FID)



• Synonyms

- *FISP (Fast Imaging with Steady-state Precession): Siemens*
- *GRASS (Gradient-Recalled Acquisition in the Steady State): GE*
- *FFE (Fast Field Echo): Philips*

• 정의

- 짧은 TR을 가지고 연속되는 RF pulse에 대한 잔류 transverse magnetization을 spoiling시키지 않는 경사예코 기법.

- RF pulse가 연속되어 steady state (항정상태)에 이르면 잔류횡자화 부위가 longitudinal magnetization에 덧붙여져 SNR에 기여한다.

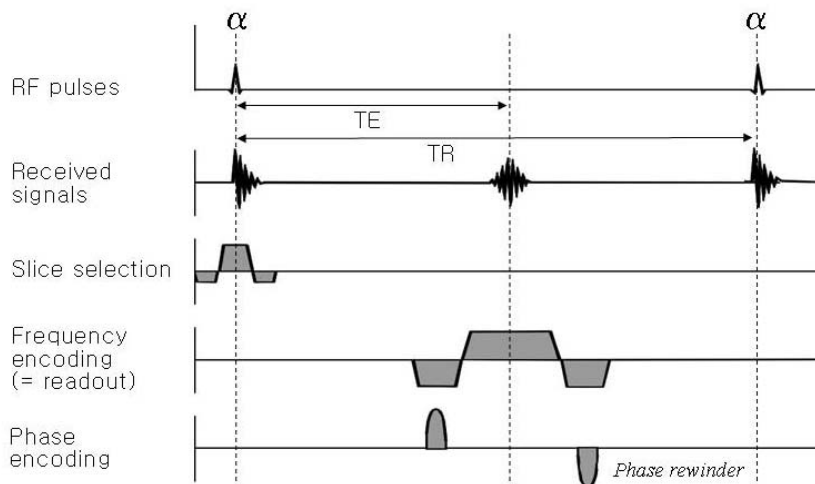
- **특성**

- TR이 길면 잔류횡자화가 없어져서 spoiled sequence와 같은 contrast를 보이지만 TR이 짧으면 T2*/T1 contrast를 보인다.
- SNR은 spoiled sequence에 비해 우수하다.
- TR을 짧게 할 수 있기 때문에 3D 또는 sequential 2D imaging이 가능하며 복부에서 contrast-enhanced MR angiography에 적용한다.

- **단점**

- Flow에 의한 dephasing에 매우 민감하다.
- Contrast의 특성이 애매하다.

- ◆ **Balanced SSFP = trueFISP**



- **Synonyms**

- *TrueFISP:* Siemens
- *FIESTA (Fast Imaging Employing STeady-state Acquisition):* GE
- *Balanced FFE:* Philips

- **정의:** Unspoiled gradient echo로서 기본적으로는 FISP과 같으나 영상을 얻기 위해 적용하는 gradient의 합이 3방향 (frequency, phase, and slice encoding direction)에서 각각 zero이다 (한 TR내에서 3방향의 gradient에 의해 dephasing된 요소는 없어지게 된다).

- **배경 및 특성**

- 이렇게 완전한 balanced sequence를 만들기 위해서는 매우 짧은 TR내에서 gradient switching이 일어나야 하기 때문에 기기의 발달에 시간이 필요했다. Siemens에서는 이것을 이전의 partially balanced sequence인 FISP과 구분하기 위해 trueFISP이라는 명칭을 붙였다.
- 매우 영상속도가 빠르며 SNR이 높다.

- Contrast의 특징은 T2/T1이며 (TR내에서 gradient에 의한 dephasing이 없으므로 T2*의 요소는 거의 없다) T2가 매우 길어서 T1에 가까운 water같은 경우 가장 bright한 signal을 보이게 된다.

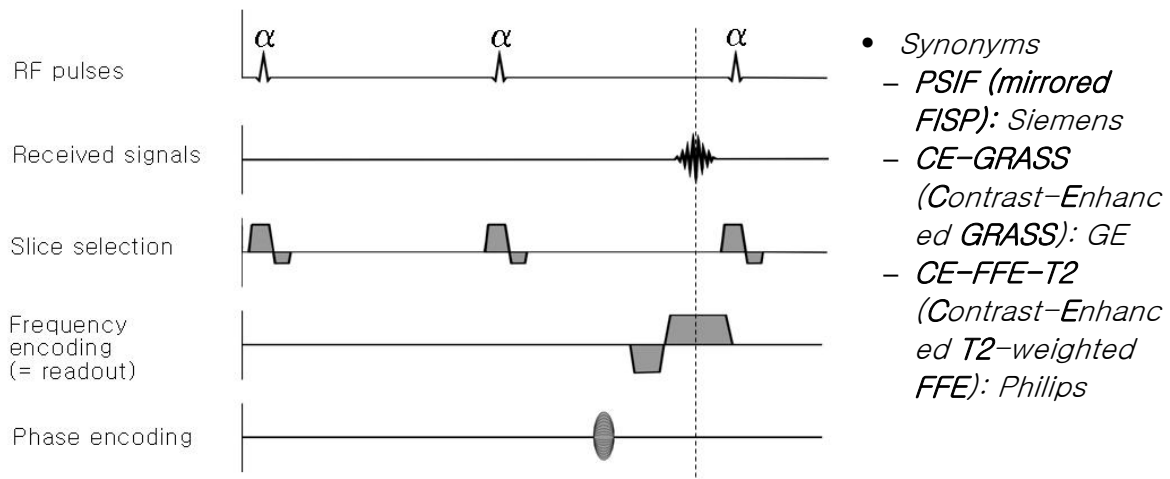
- 단점

- 물과 같이 T2가 긴 물질을 제외하고는 signal의 특성이 애매하다.
- “banding artifact”: 자장보정이 불완전하거나 물과 공기의 경계면과 같이 susceptibility effects가 큰 부위에서는 미세한 precession속도의 차이에 의해 steady state가 유지되기 어려울 수 있다 (off-resonance effect). Phase차이가 극단적으로 180° 도가 되는 부위에서는 signal이 급격히 떨어진다.

- 임상적용

- Abdominal imaging에서 localization sequence로 쓰인다. 움직임을 조절하기 어려운 emergency환자에서 anatomic detail을 파악하기 위해 유용할 수 있다.
- Gallbladder, bowel, portal vein, IVC등이 hyperintense하게 나타나며 anatomic detail이 좋으므로 contrast agent를 쓰지 않은 상태에서 venous anatomy를 파악할 수 있고 영상속도가 빠르기 때문에 cardiac imaging에의 적용도 가능하다.

- ◆ SSFP-Echo



- 정의: Unspoiled gradient echo sequence에서 반복되는 RF pulse로 야기되는 spin-echo signal의 요소를 sampling한 것. (참조: FISP에서는 FID요소를 sampling한 것)
- 특성
 - 연속되는 RF pulse들은 그 자체가 어느정도는 스피네코 sequence의 180° 반전펄스의 역할을 하여 이전의 RF pulse후에 dephase된 transverse component들을 rephase시킨다. 이 때 적당한 시기(RF pulse repetition의

- 직전)에 read-out gradient를 걸어서 spin echo와 유사한 signal을 얻게 된다.
- TR에 비해 TE가 2배 가량 길다.
 - Spin-echo와 유사하므로 T2*보다는 T2 contrast를 보이게 된다(heavily T2-weighted contrast를 얻을 수 있어 CSF등의 fluid가 매우 bright하게 나타난다)

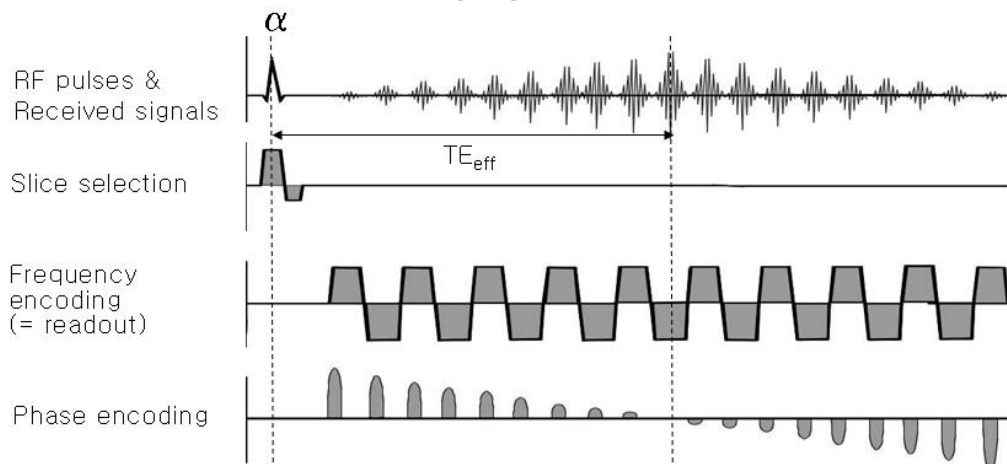
◆ DESS: Dual-Echo Steady State

- 정의:
 - Unspoiled gradient echo에서 한 TR period에서 나오는 SSFP-FID (eg, FISP)와 SSFP-echo (eg, PSIF [mirrored FISP])의 signal들을 하나의 영상에 구현한 것.
- 특성:
 - 기존의 FISP영상의 특성에 T2w spin echo를 조합한 영상특성이 나오기 때문에 fluid의 signal이 더욱 bright해 보인다.
 - 근골격계 영상에서 high-resolution bright-fluid 3D examination에 이용한다

◆ CISS: Constructive Interference in the Steady State

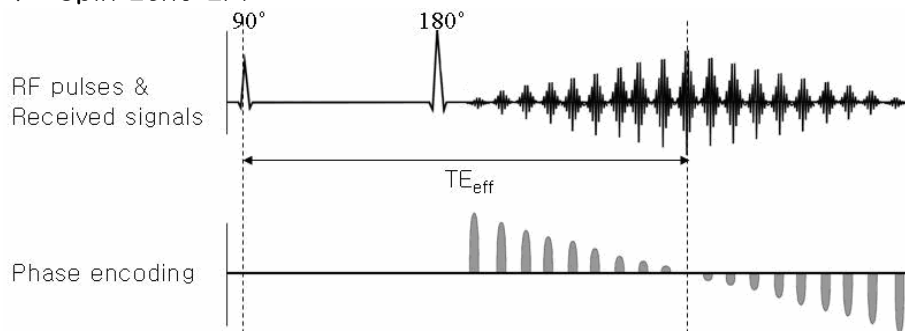
- Synonyms
 - *CISS: Siemens*
 - *FIESTA-C (Fast Imaging Employing STEady-state Aquisition and phase Cycling): GE*
- 정의 및 배경:
 - trueFISP을 기반으로 "alternating phase" RF pulse를 이용한 것과 non-alternating phase RF pulse를 이용하여 만든 두개의 trueFISP image들을 서로 조합하여 banding artifact를 제거하는 것.
- 특성:
 - 초정밀도의 heavily T2-weighted 3D imaging이 가능하여 cochlea, labyrinth, and cerebellum의 영상에 이용한다.

11. EPI (Echo Planar Imaging)

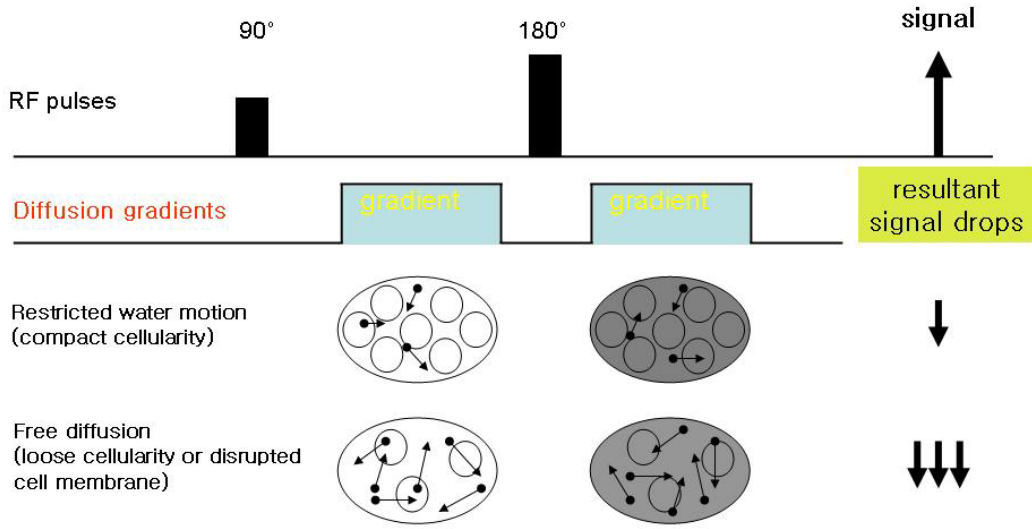


- **배경 및 정의**
 - 매회의 RF pulse때 다수의 k space line을 채우는 방법이다.
 - RF pulse 후 readout gradient의 상하방향을 매우 빠르게 연속적으로 바꿈으로서 k space matrix의 좌우방향정보를 얻음과 동시에 phase gradient로 상하방향정보를 얻는다.
- **특성**
 - 1초 이내에 2D영상 하나를 만드는 매우 빠른 기법이며 매우 강력한 T2* weighted image이다.
 - Diffusion이나 perfusion등의 functional imaging에 널리 쓰인다.
 - 1회의 pulse로 k space전체의 data를 얻는 single-shot기법과 여러개의 RF pulse로 data를 나누어서 k space를 채우는 multi-shot기법이 있다.
- **단점**
 - pixel사이에 phase gradient가 낮아 susceptibility effects나 불균등한 자장에 민감하여 영상의 찌그러짐이 발생하기 쉽다.
 - phase-encoding방향으로 ghost artifact가 발생하며 T2* decay정도가 다른 pixel들 사이의 blurring으로 공간해상도가 떨어진다.
 - Frequency encoding방향의 gradient차이가 적어(= bandwidth가 좁아) chemical shift artifact가 커지게 되며 이 때문에 EPI에서는 보통 fat suppression을 시행한다.

◆ Spin Echo EPI

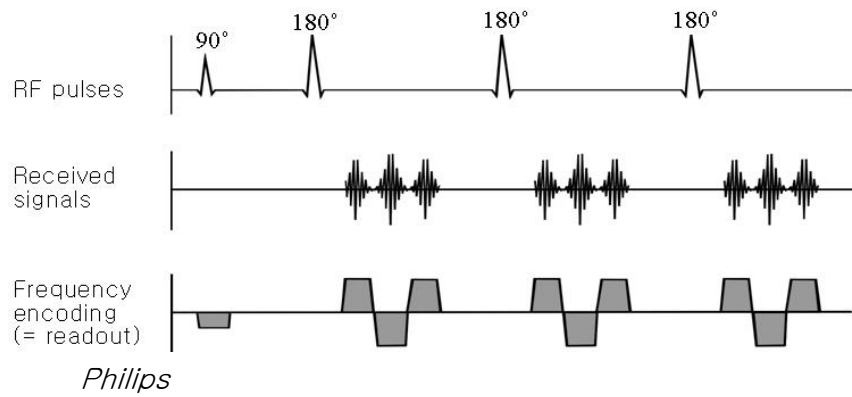


- **배경 및 정의**
 - k space의 central line을 획득할 때 transverse magnetization이 refocusing되도록 하면 T2*효과나 artifact를 줄일 수 있다.
 - Spin echo기법과 마찬가지로 RF pulse와 180° 재집중 pulse를 가한 후 EPI기법으로 k space를 채우는 방법이며 영상의 대조도는 T2*보다는 주로 T2강조에 가깝다.
 - 복부의 diffusion weighted imaging에서 주로 쓰는 기법이다.
- **diffusion weighted imaging**



- Regions of elevated signal intensity in the diffusion-weighted image reflect long T2 and/or restricted diffusion.

12. Gradient/Spin Echo Hybrid



- Synonyms*
 - TurboGSE (Turbo Gradient Spin Echo): Siemens
 - GRASE (Gradient Echo And Spin Echo): GE,

- 정의 및 배경**
 - 각 RF pulse당 두 개 이상의 gradient echo (EPI) 및 spin echo (RARE)를 복합하여 k space의 여러 line들을 채우는 방법.
 - T2-weighted imaging이며 주어진 시간에서 RARE에 비해서는 해상력이 좋고 EPI에 비해서는 영상왜곡이 덜한 영상을 얻을 수 있다.
- 특성**
 - 극단적으로 EPI factor (number of gradient echoes per spin echo)가 1이면 RARE가 되며 turbo factor (number of spin echo)가 1이면 spin-echo EPI가 된다.
 - RARE에 비해 T2* effect가 강하며 fat의 signal이 높지 않다.
 - 180° pulse들의 간격이 넓으므로 SAR도 낮다.

- 단점
 - 영상획득 중 T2 decay를 하는데 각각의 180° pulse사이에 획득하는 k space내 에코열들(EPI요소들)은 서로 T2감쇄의 정도가 달라 ghost artifact가 심할 수 있다.

참고문헌

- Nitz WR. MR imaging: acronyms and clinical applications. Eur Radiol 1999; 9(5):979-997
- Boyle GE, et al. An Interactive Taxonomy of MR Imaging Sequences. Radiographics 2006;26:e24
- DG Mitchell 저, 김명진 역. 자기공명영상의 원리(MRI Principles: a guide for the mathematically illiterate). 고려의학