

## Fast MR Imaging in the Brain

인제의대 방사선과학교실  
은 충 기

### 1. 서론

초기의 MR영상시대에 많은 사람들은 MR은 slow technique이고 신속영상화는 어려울 것으로 생각되었다. 그러나 최근 새로운 전자 장비의 기술개발, 고속처리가 가능한 중앙처리 장치, 증가된 RAM, 수많은 data를 저장할 수 있는 컴퓨터, 고성능의 초전도자석, 증가된 gradient strength 및 rise time 등 기계적인 발전으로 msec단위의 초고속 영상이 가능하게 되었다.

어느 정도 신속하여야 신속 영상인지 정확한 기준은 없지만 대개 신속 MR 영상은 수초 내지 십초정도의 2차원 영상을, 초신속 MR영상은 100msec 전후의 빠른 영상을 말한다. 과거의 보편적인 MRI기법은 상대적으로 긴 주사시간 때문에 3차원 영상법을 사용할 수 없고 운동에 의한 인공물이 증가되었다. 그리하여 신속영상화로 환자의 고통을 덜어주고 환자의 촬영건수를 늘리고 혈액 및 뇌척수액의 영상화 때문에 신속영상화가 필요하게 되었다. 최근 각종 새로운 펄스파형의 개발로 신속 영상화가 가능하게 되어 각종 해부학적 진단 뿐만 아니라 뇌기능까지도 알 수 있게 되었다. 영상획득시간은 다음과 같다

$\text{Total acquisition time} = \frac{\text{TR} \times \text{Np} \times \text{NEX}}{\text{ETL or TF}}$ <p>TR : Repetition time,                      Np : Phase encoding step</p> <p>NEX : Number of excitation, ETL(TF) : Echotrain length(Turbofactor)</p>
---

따라서 TR을 짧게 하거나 (주로 Gradient echo기법), k-space에서의 수집정보를 축소하거나, sampling rate를 빠르게 하거나, ETL을 늘리거나, 위상부호화를 따라 multiple lines을 scan함으로써 신속영상을 얻을 수 있다.

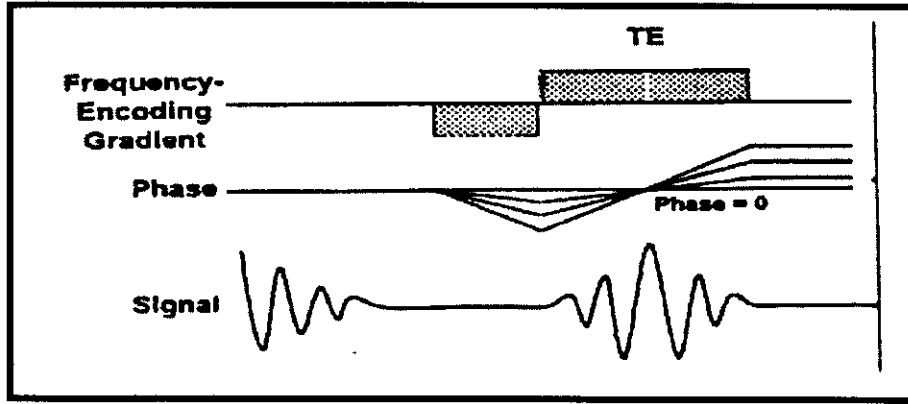
### 2. Fast Imaging 방법 및 clinical applications.

#### (1) Short TR기법 (주로 Gradient echo기법)

주파수 경사자장을 반전하여 신호를 받으며 TR을 짧게 하고 flip angle을 감소시키는 Gradient echo기법이 임상에 많이 응용되고 있다.

Gradient echo기법에는 원하지 않는 횡자화를 제거하기 위한 spoiler gradient 사용하는 spoiled 기법과 수직과 수평자화를 그대로 존속시켜 신호를 끊이지 않고 계속되는 steady-state기법이 있다.

또한 2개의 GE를 합치거나 (CISS), 다른 sequence를 혼합 (Turbo-flash MP-RAGE)한 방법들도 있다. 회사별 Fast MR용어의 요약은 (AJR: November 1995:168:1108) 참고하시기 바랍니다.



Principle of the gradient echo.

#### A) Spoiled gradient echo

- FLASH (Fast low angle shot) = SPGR (spoiled gradient recalled acquisition) = CE-FFE (Fast field echo) T<sub>1</sub> steady state의 횡자화를 spoiling gradient에 의해 제거하는 방법으로 FLASH가 있고 RF pulse를 spoiling하여 횡자화를 없애는 SPGR, CE-FFE T<sub>1</sub> 등이 있다.
- TR이 짧기 때문에 T<sub>1</sub>강조 breath hold 기법에 이용된다.
- Turbo-FLASH (MP-RAGE, SPGR-prepared) GE기법에 의하여 T<sub>1</sub> 강조영상을 신속히 얻는 방법으로써 역동적 검사나 짧은 시간에 3차원 영상을 얻는데 이용된다. 이 기법은 180° preparation pulse를 주어 조직의 자화를 발전시키고 T<sub>1</sub> (Inversion time)을 기다린 후 α° 의 RF pulse를 반복하여 주는 초고속 영상기법 중 하나이다. 혈관조영술이나 척추 영상에 많이 이용된다.

#### B) Steady state 기법

- GRASS (Gradient recall acquisition in steady state)
  - = FISP (Fast imaging with steady state precession)
  - = FFE (Fast field echo)

TR이 T<sub>2</sub>보다 작을 때 수평자화는 지속되며 수직자화와 수평자화의 존속으로 GE FID에 바로전 rf pulse로부터 발생된 spin echo가 추가되어 신호가 끊이지 않고 계속되는 상태를 steady state라 한다.

long T<sub>2</sub>가진 조직 (CSF) 등은 고신호를 나타내고 steady state효과는 flip angle이 클 때 그 효과가 증강되며 flip angle이 작을 때는 이완 시간에 영향을 받지 않고 proton농도 차이를 반영한다.

Steady state하에서 신호강도는 주로  $\frac{T_2}{T_1}$ 에 의해 좌우되나 대부분 뇌조직들의  $\frac{T_2}{T_1}$

가 0.1 - 0.2로 차이가 적어 뇌조직간의 대조도가 비교적 낮다. 그러나 CSF의  $\frac{T_2}{T_1}$ 가

0.5로 뇌조직과 CSF는 비교적 큰 대조도를 이루고 있다.

FISP의 변형인 true-FISP는 움직임에 의한 스핀 dephasing으로 신호가 감쇄되는 것을 줄이기 위하여 FISP의 FID신호와 PSIF의 (Time reversed FISP)의 echo 신호를 합쳐 영상을 만든다.

FISP나 GRASS에서는 빠른 CSF flow시 저 신호를 나타내나 True-FISP에서는 gradient balancing으로 인한 움직임 보상 때문에 high CSF flow까지도 고신호를 나타낸다.

## # Clinical applications of GE image.

1. 주로 flow영상 특히 MR 혈관촬영술 및 CSF flow평가
2. 뇌출혈 및 석회화 detection.
3. 3-D GE 영상 - cervical spine diseases와 종양의 수술전 계획
4. Steady state GE - 낭종과 고형종괴 구분
5. 혈관병변 - ① 동정맥 기형  
② SE에서 종양내 signal void가 석회화인지 혈관인지 감별  
③ 혈관 내강이 patent 한지 thrombose되어 있는지 감별

## # GE영상의 단점

1. 고신호 강도 혈종에서 혈전 methemoglobin이나 flow가 있는 lumen 모두 고신호 강도로 구별이 안된다.
2. 부비동 가까이 위치한 전두하 또는 하측두엽 또는 Sella부위 병변에서는 자화 민감도 때문에 심한 저신호를 보이게 된다.
3. Magnetic gradient moment nulling시 고혈류 혈관도 고신호를 보일 수 있다.
4. 혈액의 와류시 신호 결핍을 보일 수 있다.

## (2) k-space에서 수집정보의 축소

1. 획득 matrix 숫자의 축소

전 data의 80%까지 축소는 보통 자주 이용된다. 그러나 더 이상 감소시키면 영상의 명확도가 감소됨.

2. Half scan

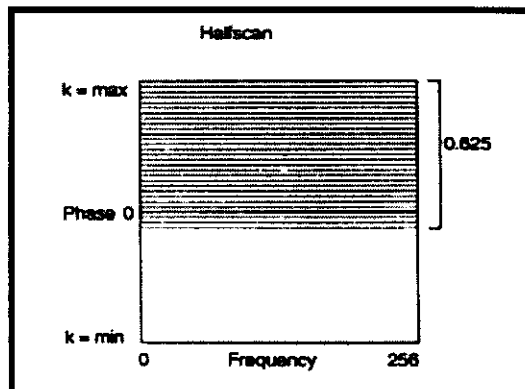
k-space는 원점을 중심으로 위상보호화 및 주파수 부호화 방향으로 대칭되어 있기 때문에 k-space의 반의 data만 얻으면 나머지 반은 쉽게 채울 수 있다. 위상 부호화 수를 반으로 하면 영상시간은 1/2로 줄어든다. 실제로 k-space의 중앙부분의 data를 조금 더 얻는데 이것은 phase distortion을 보정하여 좋은 영상을 얻기 위함이다.

- \* HASTE (Half-Fourier single shot turbo spin echo)

(Single shot fast spin echo=RARE)

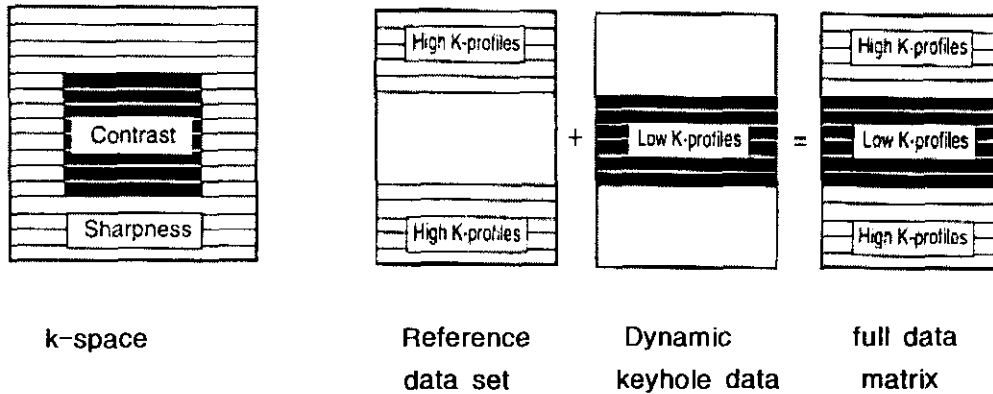
TSE의 한 기법으로써 긴 TR사이에 아주 많은 echo-train length (ETL 또는 turbo factor)을 이용하여 K-space의 약 1/2정도의 data를 얻으므로 (HASTE) 매우 짧은 시간내에 영상을 얻는 방법으로 주로 담체관 조영술에 주로 이용되나 뇌 MRI에서는 환자상태가 좋지 않거나 검사에 협조가 잘 안되는 환자나 소아환자에서 보편적인 TSE영상을 대신하여 사용할 수 있다.

영상획득시간이 매우 빠르면서 (1slice 당 2초) heavily T<sub>2</sub>강조의 장점이 있어 fetal anomaly에 이용될 수 있고 brain surface anatomy를 보는데도 도움을 준다.



### 3. Keyhole영상

Keyhole스캔은 영상획득 시간을 줄이기 위해 K-space의 일부 특히 contrast resolution을 좌우하는 central low-k profiles data만을 짧은 시간에 얻는 방법으로써 missing part인 k-space의 high-k profiles data를 reference image로부터 복사하여 완전한 영상을 얻게된다. 이 영상은 뇌 또는 신장 병변의 dynamic imaging에 이용되는 신속 영상기법중 하나이다. Dynamic imaging은 높은 시간 해상력과 다수 section을 필요로 한다. 그래서 짧은 시간에 small keyhole data를 모든 k-space에 채우는 keyhole 영상이 유용하다.



### 4. Rectangular field of view

K-space의 lines의 50%만 얻으면 scan time은 50%감소한다.

spatial resolution은 영향받지 않으나 SNR은 감소한다. 임상적으로 spine, extremities angiography 및 소아영상에 이용될 수 있다.

### (3) Multiple lines scanning techniques

#### 1. FSE (fast spin echo) = TSE (turbo spin echo)

현재까지 임상에서 가장 널리 이용되고 있는 pulse sequences 중 하나이다.

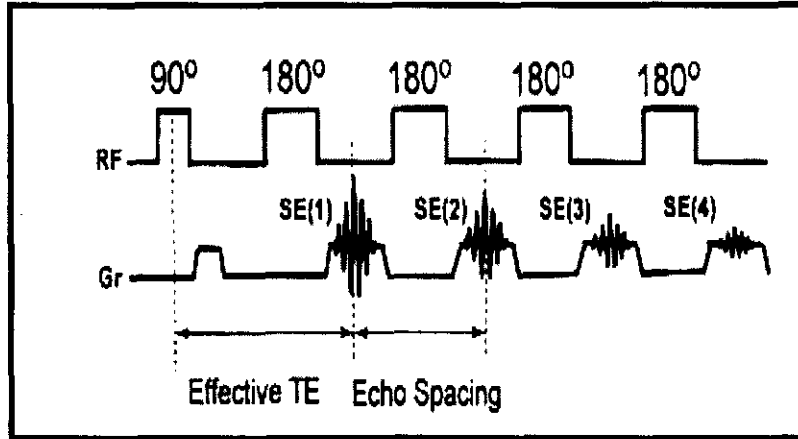
기본개념은 multiple spin echo pulse sequence이다. 90° pulse를 가한 후 여러번의 180° pulse를 가하여 여러번의 echo를 받아 영상을 만든다. phase-encoding 방향으로 256개의 pixel수를 가진 영상을 얻을시 한번의 pulse sequence마다 180° pulse를 8번 가하여 8개의 echo signal을 얻는다면 반복해야 하는 pulse sequence의 수를 32번으로 줄일 수 있다. 이때 하나의 TR당 가해지는 180° pulse의 수를 echo train length (ETL) 또는 turbo factor라고 하며 ETL이 16이라면 보편적인 SE에 비하여 영상획득 시간을 16/1로 줄일 수 있다. 하나의 pulse sequence (1 TR)에서 가장 큰 크기의 신호를 얻는 시간을 effective TE라고 한다. 장 점으로는 FSE는 종래의 SE에 비하여 빠른 시간내 영상을 획득할 수 있고 영상의 질이 높으며 true T<sub>2</sub> contrast를 보여준다.

특징: ① 종래의 보편적인 SE에 비하여 fat이 여러번의 180° pulse 때문에 연속적인 refocusing으로 인해 diffusion 효과가 상쇄되어 신호소실이 작아 고신호 강도로 보인다.

② 보편적인 SE에 비하여 magnetic susceptibility효과가 감소된다.

여러개의 180° refocusing pulse들이 비균질한 자장을 지나더라도 연속적으로 rephasing됨으로 dephasing효과가 적다 특히 출혈 신호강도가 SE만큼 낮지 않으며 이때 GE영상을 얻을 필요가 있다.

- ③ Magnetization transfer 효과가 증가된다.
- ④ ETL이 길수록 blurring artifact 및 edge enhancement가 나타난다.

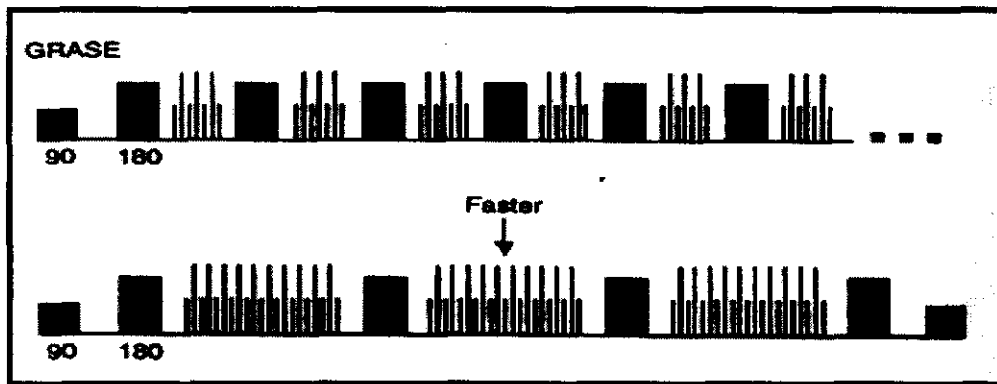


Fast Spin Echo

\* SSFSE (single shot fast spin echo)는 FSE의 한 기법으로써 하나의 긴 TR내에 수많은 ETL을 적용함으로써 초고속 영상획득을 이룰 수 있고 이중 k-space의 data를 반 정도 얻어 영상획득 시간을 단축한 것이 HASTE이다. HASTE에 관해서는 이미 설명 드렸으므로 생략한다.

### 2. GRASE (GRADient - EPI + Spin Echo) 또는 TGSE (Turbo Gradient Spin Echo)

TSE, GE-EPI 장단점을 보완한 SE와 GE를 혼합한 기법으로써 TSE의 다수의 180° pulse 사이에 다수의 EPI 또는 경사자계 에코를 얻는 기법이다. (diagram 참조) 이 기법은 TSE의 지방조직 고신호 강도, 자화전이에 따른 신호강도의 차이 및 자화율 효과의 감도 등의 단점과 EPI의 자화율화 인공물이 생기는 단점을 보완하여 영상 획득시간이 빠르면서 (TSE의 1/3정도) TSE에 버금가는 고해상력의 영상을 얻을 수 있다. 그러나 다소 인공물에 민감한 단점이 있다.



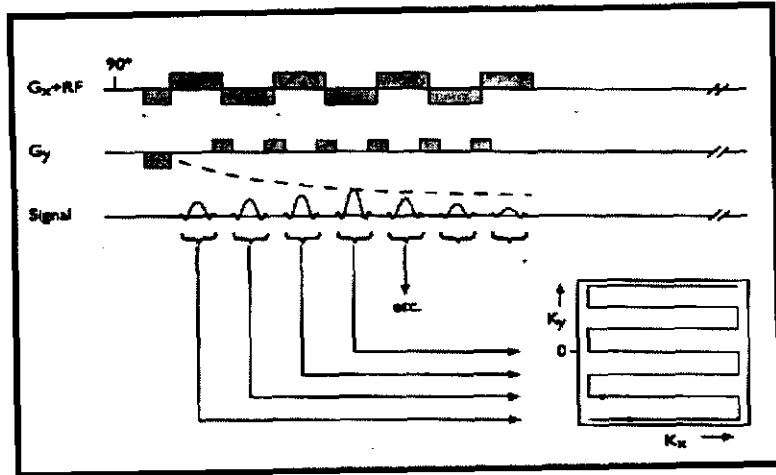
### 3. Echo Planar Imaging (EPI)

single shot EPI와 multishot (interleaved) EPI가 있다. single shot EPI는 하나의 pulse excitation에 전 영상의 data를 k-space를 따라 Zig-Zag trajectory하면서 초고속으로 영상을 얻을 수 있는 현재 MRI기법 중 가장 빠른 방법이다. 영상획득 시간이 100msec 이내로 매우 짧기 때문에 심장, CSF박동, 호흡 등과 같이 physiologic motion에 영상이 더 이상 왜곡되지 않는다.

Readout (frequency encoding) gradient의 일련의 빠른 reversal과 매우 짧은 phase encoding gradient가 요구되며 gradient switch가 매우 빨라야 하고 rise time이 짧아야 한다. 최근 gradient

amplitude가 20mT/m이상이고 slew rate가 200mT/m/sec이상인 고성능 기계가 각 회사에서 개발되어 있으며 128x128 EPI영상은 100msec이내에 영상획득이 가능하므로 움직임에 의한 인공물은 걱정할 필요가 없다. GE와 다른 점은 한번의 TR동안에 한 개 이상의 gradient echo를 생산하고 (+)와 (-)극성을 가진 주파수 경사자계를 사용함으로써 연속적으로 "odd"와 "even" gradient echo를 발생시킨다.

Multishot, segmented, 또는 interleaved EPI는 single excitation pulse 대신에 몇 번의 excitation pulse를 가하는 방법으로써 single shot보다 resolution이 증가하고 artifact가 감소한다.



K-space trajectory for an echo planar image acquisition

EPI에 있어서 대조도는 GE-EPI에서는 TR, TE, flip angle에 의하여 결정되며 90°, 55° 등 각도가 크면 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>혼합 강조 영상이 되며 30° 이하에서는 T<sub>2</sub>가 강조된다.

SE-EPI에서는 short effective TE에서는 heavy proton-density가 강조되고 180° pulse와 echo train을 offsetting함으로써 T<sub>2</sub>가 강조된다. EPI는 다음과 같은 문제점이 있다. 신속화는 가능하나 화소를 줄여야 함으로 해상도가 낮다. 자장의 불완전성, 와전류 등으로 인하여 ghost artefact, 자화를 및 화학적 이동 인공물이 생긴다. 이때 지방 억제가 필수적이다. 그러므로 EPI는 초고속 영상 뿐만 아니라 physiology 및 뇌기능을 평가하는데 이용될 수 있게 되었다.

### (1) Echo-planar FLAIR (Fluid attenuated inversion recovery image)

FLAIR영상은 뇌의 CSF 속에 있는 free water로부터 나오는 신호를 억제 하는 IR방법으로서 T<sub>2</sub> 강조영상의 대조도를 유지하여 뇌 병변을 찾는 데 매우 유익한 최근 뇌질환의 진단에 널리 이용되는 기법이다.

보편적인 FLAIR 영상은 획득시간이 수분으로 매우 긴 편이나

① EPI-FLAIR는 수초 내에 영상획득이 가능하며 초기 뇌경색 및 감염 외상 또는 탈수초성 질환 등 초기의 subtle한 병변 (출혈 또는 혈관종 등)을 찾는 데 180°의 Inversion pulse후 CSF의 수직자화가 zero (2700msec at 1.5T)시간에 90° pulse를 준 후 EPI기법을 이용하여 신호를 얻어 영상을 만든다. magnetic susceptibility가 증가됨으로써 점상출혈이나 석회화 병변을 찾는 데 유리하나 해상력이 다소 떨어지며 두개저나 무비동 가까이에 인공물이 생기는 단점이 있다.

② Turbo-FLAIR는 180°의 inversion pulse후 CSF의 수직자화가 Zero인 시간에 90° pulse를 준 후 FSE에서와 같이 180° pulse를 반복하여 신호를 얻는 방법이나 EPI-FLAIR보다 영상획득 시간이 다소 길다.

## (2) Perfusion imaging (관류 영상)

경정맥으로 투여된 paramagnetic 또는 Supermagnetic agents에 의해 local magnetic susceptibility 차이를 이용하여  $T_2^*$ 강조 증강 영상을 얻고 관류 지도를 얻을 수 있는 capillary microcirculation을 관찰할 수 있는 영상기법이다. Capillary blood volume이 더 많은 gray matter가 white matter보다 신호강도가 더 심하게 감소된다. Dynamic imaging 동안에 concentration-time data로부터 regional cerebral blood volume이 결정되고 영상으로 얻어진다. 이 관류 영상은 초기 뇌졸중 환자의 진단 특히 ischemic penumbra의 평가 및 추적검사에 유용하며 종양의 재발과 방사선 괴사를 감별하는데도 유용하다.

## (3) Diffusion Imaging

MR영상에서는 T1, T2 효과를 보지만 이 확산 영상은 보편적인 EPI기법을 이용하여 물분자의 확산 현상을 평가하는 최신기법이다. 인체안의 물의 약 70%정도는 extracellular space에 위치하고 있다. 급성 뇌졸중의 경우 뇌세포가 팽창하게 되면 extracellular space가 좁아지게 되고 extracellular space의 물분자의 확산 이동이 적어지게 된다.

### # Clinical Indication of diffusion imaging

- ① Hyperacute 및 chronic infarction의 진단 및 감별
- ② Solid tumor와 cystic tumor의 감별
- ③ Reperfusion후 reversible ischemic injury의 평가
- ④ Myelination state에 대한 정보가 가능
- ⑤ Dysmyelination과 demyelination의 조기 관찰 및 characterization

· 주로 single short EPI기법이 이용되나 최근에는 navigator echo를 이용하여 움직임 보상을 받는 multishot (segmented) EPI가 개발 이용되고 있으며 해상력이 많이 향상되었다.

## (4) Functional MR imaging

뇌는 부위별로 고유한 기능을 지니고 있으며 특정기능을 수행하기 위하여 해당 부위의 뇌신경 활동이 항진되면 해당부위의 국소적 뇌혈류 및 대사가 증가되는데 이를 평가하는 것이 기능적 MRI이다. 여러 종류의 기법이 있으나 BOLD (Blood Oxygen Level Dependant)기법이 널리 사용되고 있으며 BOLD contrast영상은 task performance에 반응하는 국소 신호강도의 변화를 관찰할 수 있게 되었다. 조영제를 사용하지 않고 혈관내 endogenous paramagnetic deoxyhemoglobin의 국소 변화에 주로 의존하는 영상기법이다. 뇌의 국소적 활성화 → 뇌혈류의 국소적 증가 → 필요이상의 과도한 산소 공급 → 유출 정맥계내의 deoxyhemoglobin농도 감소 →  $T_2^*$ 강조영상에서 신호강도로 이어진다.  $T_2^*$ 강조영상에서 감산영상을 만들고 noise 제거 후 활성화 영상을 얻고 T1강조영상에 중첩하여 기능적 MR영상을 얻게 된다. 운동 및 언어 중추, cognitive function등을 영상화하기에 이르렀으며 뇌수술 고려할 때 중요한 뇌기능의 위치를 사전에 파악하고 수술로 인한 뇌기능의 손상 예측에도 이용된다.

## (5) Echo-planar Spectroscopy

뇌의 주어진 표본내에서 metabolism에 따른 생화학적 정보를 얻는 방법으로 현재까지 뇌에서는 주로 proton spectroscopy가 많이 이용되고 있다. 현재까지 국소적 생화학적 정보를 얻을 수

있는 single voxel spectroscopy (STEAM, PRESS pulse sequence등)가 주로 이용되고 있다. 그러나 최근 Echoplanar 기법을 이용한 spectroscopy, 소위 PEPSI (proton Echo Planar Spectroscopic Spectroscopy)가 가능하여 많은 (32x32) voxels의 많은 spectrum을 짧은 5분 이내에 얻을 수 있게 되었다. spectrum 뿐만 아니라 동시에 metabolites (N-acetylaspartate, choline, creatine, lactate등) maps의 color 영상이 가능하여 metabolites의 gross inspection이 가능하게 되었다. 따라서 병변 부위와 정상부위의 metabolites의 분포를 spectrum뿐만 아니라 imaging을 통하여 직접 분석할 수 있게 되었다.

#### 4) 기타 Fast MR angiography

##### Contrast-enhanced MR Angiography (CEMRA)

기존의 영상획득에 수분 걸리는 TOF (time of flight) 또는 PC (phase contrast) angiography와는 달리 조영제 (Gd-DTPA 등)를 사용하여 짧은 시간에 동맥 영상만을 초고속으로 얻을 수 있다. Fast gradient & slew rates (gradient strength 23-27 mT/m, slew rate : 75-120 mT/m/msec)을 가지고 고성능 MR기계에서만 가능하다. GRASS, FFE, turboflash, FISP등 gradient echo 영상기법을 이용하여 breath hold scan을 할 수 있다. 이 영상에서는 scan time을 짧게 할수록 peak arterial enhancement 시기에 촬영할 수 있어 정맥없이 동맥만을 촬영할 수 있고 고속 MR 혈관조영술기법이다. 최근에는 조영제 주입 후 movie track을 이용하여 MR digital subtraction angiography 할 수 있다는 보고가 있다.



## 참고문헌

- (1) Peterson J, Sain : S · Fast MR imaging : technical strategies. AJR 1995;165:1105-1109
- (2) 本間一弘 : Echo-Planar 法, 嚮象診斷, 11卷 1号. 1991, 169-189
- (3) 이성우, 은충기, 문치웅, 박수성, 최신자기공명영상학 서울, 여문각, 1998, 169-189
- (4) Phyllips : Basic principles of MR. Imaging, Imaging Sequences. p59-86
- (5) Atlas SW. Magnetic resonance imaging of the brain & spine, Fast imaging. Lippincott-Raven, Philadelphia, 1996. p1413-1499
- (6) Atlas SW, Fram EK, Mark AS, Grossman RI. Vascular intracranial lesion : application of fast imaging. Radiology 1988, 169:449-453
- (7) Atlas SW, Mark AS, Gomori JM. Grossman RI. Intracranial hemorrhage : gradient echo imaging at 1.5T. Comparison with spin-echo imaging and clinical applications. Radiology 1988;168:803-807
- (8) 이종욱, 이영준, 은충기 등, 뇌자기공명 영상에서 GRASE 기법과 Turbo spin echo 기법의 비교. 대한방사선의학회지 1998;38:577-583
- (9) 정현우, 김학진, 김창원 등 안구내 병변의 MR 영상에서 CISS 기법의 유용성, 대한방사선의학회지. 1998;38:595-600
- (10) 차성호, 서정진, 오희연 등. 뇌자기공명 영상에서 Single-shot Fast Spin Echo기법과 T2-weighted Fast Spin-Echo 기법의 비교. 대한방사선의학회지 1998;39:435-440
- (11) Sargent MR, Poskitt KJ. Fast FLAIR MR imaging of the brain : a Comparison of multishot echo-planar and fast spin-echo techniques. Pediatr Radiol, 1997;27:545-549
- (12) Price PR. Contrast mechanisms in gradient-echo imaging and an introduction to fast imaging. Radiographics 1995;15:165-178
- (13) Simonson TM, Magnotta A, Ehrhardt JC, et al : Echo-planar FLAIR imaging in evaluation of intracranial lesions Radiographics 1996;16:575-584
- (14) Van Vaals JJ, Brummer ME, Dixon WT, et al : "Keyhole" method of accelerating imaging of contrast agent uptake, JMRI 1993;3:671-675
- (15) Pierpaoli C, Jezzard P, Basser PJ, Barnett A. Chiro GD. Diffusion tensor MR imaging of human brain. Radiology, 1996;201:637-648
- (16) 장용민, 서경진, 김종기, 이종민 : Concept of K-space, fast spin echo의 이해, Echo-planar 및 flow imaging, 대구경북 자기공명영상연구회 연수강좌, 1998. p34-75
- (17) 오창현, 김학진, 정은철, 이호규 : MR pulse sequences의 기본원리와 임상응용. 1998. 신경두경부 방사선과학 연구회 제12차 학술대회 초록집. p27-76.
- (18) 정광우, 장용민, 이정희, 정은기, 이호규, Easy understanding of MR physics. 대한자기공명영상학회 '98 춘계 학술대회 초록집. p1-43.