

# Pulse Sequences: Gradient Echo

성균관대학교 김 승 훈

## 강 의 목 표

1. Gradient echo의 원리를 이해한다.
2. Gradient echo의 장단점을 이해한다.
3. Gradient echo의 종류를 이해한다.

고식적인 스핀에코 기법은 시간이 많이 걸리기 때문에 검사할 수 있는 환자수가 제한될 뿐 아니라, 환자가 장시간 magnet 안에 누워있어야 하기 때문에 움직임에 의한 인공물과 호흡에 의한 인공물이 많이 발생하는 단점이 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 빠른 속도로 스캔할 수 있는 경사에코기법이 개발되었다. 경사란 자장의 세기가 위치에 따라 선형적으로 변하는 것이며 경사코일을 사용하여 만들게 된다. 따라서 각 위치에서 스핀이 받는 자장의 세기가 달라 세차주파수에 차이가 나게 된다. 경사에코기법은 자장의 경사로 인해 탈위상화가 빠르게 진행되는 현상과 반대 극성의 경사자장을 가하여 스핀을 재초점화 시키는 방법이다.

$$\text{Scan time} = \text{TR} \times \text{Ny} \times \text{Nex}$$

Ny(phase encoding step)은 해상도와 관련이 있고, Nex (number of excitation)은 신호강도와

관련이 있기 때문에 조절하게 되면 영상에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 스캔시간을 단축하기 위해서는 TR을 줄여야 하는 데, 영상을 만드는 데 충분한 신호를 얻을 수 있는 범위 내에서 가능한 짧은 TR을 사용하게 된다. 짧은 TR을 사용함으로써 발생하는 문제는 첫째, 시간이 걸리는 180도 펄스를 사용할 수 없다는 것과, 둘째, 90도 자극펄스를 준 다음 종축자기화가 충분히 회복되기 전에 다음 자극펄스가 가해지기 때문에 여러 번의 자극펄스를 준 후에는 종축자기화가 소실되어 없어지게 되고 결과적으로 횡축자기화도 만들어지지 않아 영상을 만들기 위한 신호를 얻지 못하게 된다는 점이다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해 경사에코기법에서는 스핀에코기법과 달리 180도 재초점펄스 대신 magnetic field gradient를 사용하여 스핀을 재초점화 하고, 90도 자극펄스 대신 작은 속임각을 갖는 펄스를 사용하여 일정한 크기의 종축자기화를 유지시키는 방법을 사용하게 된다. 경사코일을 사용하여 180도 펄스를 주기 위한 시간을 단축할 수 있고, magnetic field inhomogeneity를 증가시켜 횡축자기화의 소실을 가속시킴으로 TR을 단축할 수 있게 된다. 180도 펄스를 사용하면 external magnetic field inhomogeneity가 소실되어 횡축자기화의 소실 천천히 되지만 (T2 effect), 경사에코에서는 external magnetic field inhomogeneity가 남아 있게 되어 횡축자기화의 소실이 빨리 진행되게 된다(T2\* effect).

경사에코기법과 스핀에코기법간의 차이는 다음과 같다. 1) 경사에코기법에서는 180도 재초점펄스를 사용하지 않기 때문에 magnetic susceptibility에 더 민감하게 된다. 영상의 화질을 떨어뜨리는 단점이 있지만 작은 출혈을 찾거나 기능영상에는 도움이 된다. 2) 스핀에코기법에서는 각 cycle이 시작될 때 x-y 평면에 남아있는 자기화 (Mxy)는 거의 무시해도 되는 수준이지만 경사에코기법에서는 매 cycle이 끝난 후에 잔류 횡축자기화가 남아있고 다음 번 자극펄스의 영향을 받게 된다. 이는 경사에코기법에서는 너무 TR이 짧아 횡축자기화의 탈위상화가 완전히 되지 않기 때문에 일어나는 현상이다. 몇 번의 cycle을 지나게 되면 잔류횡축자기화는 일정한 수준 (steady state, Mss)으로 유지되게 된다. 3) 경사에코기법에서는 TR이 짧기 때문에 echo당 얻어지는 SNR은 스핀에코기법에 비해 감소하지만 단위 시간 당 더 많은 에코를 얻을 수 있기 때문에 SNR의 저하가 상쇄된다. 4) TR이 매우 짧기 때문에 한 번 자극에 1 slice만 얻게 된다. 모든 절편에서 혈관이 밝게 보인다.

경사에코기법의 장점은 빠른 스캔시간, magnetic susceptibility를 이용한 출혈 발견, 3D 영상, MR Angiography 등이 있다.

단점으로는, 작은 속임각과 짧은 TR로 인한 낮은 SNR, 자기화율인공물 증가, boundary effect에 의한 인공물 증가 등이 있다.

## 1. Tissue Contrast

검사를 시행할 때 조직대조도에 영향을 미치는 지표들 중 검사자가 조절할 수 있는 것은 숙임각 ( $\alpha$ ), TR, TE이다.

- 1) 숙임각이 작은 경우 (5-30도), 자극펄스를 준 후에도 상당히 큰 종축자기화가 남아있게 된다. 따라서 자극펄스 사이에 종축자기화는 거의 완전하게 회복된다. 따라서 T1 값이 다른 두 조직 간에 T1 곡선에 차이가 없어지게 되고 T1 회복이 조직대조도에 거의 역할을 하지 못하게 된다.
  - 작은 숙임각은 T1 강조를 감소시킨다.
- 2) 작은 숙임각의 자극펄스는 작은 횡축자기화를 만들고 결과적으로 Mss가 작게 형성되어 T2\* 강조가 약해지게 된다. 횡축자기화의 크기는 종축자기화의 크기와 직접 비례하기 때문에 조직 대조도는 양성자밀도에 의해 주로 결정된다.
  - 작은 숙임각은 proton density를 만든다.
- 3) 큰 숙임각 (75-90도)의 자극펄스는 두 조직의 T1 특성을 구분할 수 있게 한다. 하지만 TR이 충분히 길지 않은 경우 T1 회복이 되지 않기 때문에 T1 강조는 감소되고 Mss가 커지기 때문에 T2 강조가 증가하게 된다.
  - 큰 숙임각과 긴 TR은 T1 강조를 만든다.
- 4) TR이 수십 msec 로 짧은 경우 횡축자기화가 탈위상화되지 않고 다음 번 자극펄스(작은 숙임각)에도 남아있게 되어 신호를 만드는 데 기여하게 된다.
  - 작은 숙임각과 짧은 TR은 T2\* 강조를 만든다.
- 5) TR이 수백 msec로 긴 경우 T1 곡선의 회복이 많이 되어 T1이 강조되고 Mss가 거의 소실되기 때문에 T2 강조는 감소된다.
  - TR이 길수록 T1이 강조된다.
- 6) TE의 역할은 스핀에코기법에서와 유사하다.
  - 짧은 TE는 T2\* 강조를 감소시키고 PD나 T1강조를 증가시킨다. 긴 TE는 T2\*를 만든다.

## 2. Fast Scanning Technique

## (1) Gradient Echo (FISP, GRASS, FFE)

앞서 말한 바와 같이 경사에코기법에서는 TR이 매우 짧기 때문에 검사영역에 포함되어 있는 조직의 T2이완시간보다 짧아지게 된다. 따라서 이 pulse sequence에서는 다음 번 자극 펄스를 줄 때 횡자화가 일부 남아 영상의 신호강도에 영향을 미치게 된다. 횡자화의 일부가 남아 있는 것을 잔류횡자화 (residual transverse magnetization)라고 하고, 몇 번의 TR 반복을 거치면 잔류횡자화는 항정상태 (steady state)에 이르게 되고 Mss로 표시한다.

이 항정상태의 잔류횡자화는 다음  $\alpha$  고주파펄스에 의해 만들어진 횡자화에 더해져 x-y평면의 벡터 길이를 크게 한다. 긴 T2를 갖는 조직의 Mss가 짧은 T2 조직에 비해 크게 되는 즉, 더 강한 T2\* 강조의 영상을 만들게 된다.

주기 초에 가한 위상부호화경사에 의한 효과를 상쇄시키기 위해 소위 말하는 되감기 경사 (rewinder gradient)를 위상부호화 방향에서 반대가 되게 가해 주어야 항정상태의 잔류횡자화를 유지시킬 수 있다.

## (2) Spoiled Gradient Echo (FLASH, SPGR, T1FFE)

Spoiling이란 항정상태의 횡자화를 제거하는 과정을 말하며, 방법에는 고주파훼손 (RF spoiling), 경사훼손 (gradient spoiling)과 TR을 길게 하는 것들이 있다.

- 1) RF spoiling: 연속적인 RF 펄스 마다 phase offset (위상상쇄)를 추가한다. 이것은 연속적으로 발생하는 Mss vector에서 위상변이 (phase shift)를 일으키게 된다. 송, 수신기 사이에 일정한 위상 관계를 유지함으로써 (phase-locked circuit) 연속적인 Mss가 서로를 상쇄하게 만든다.
- 2) Gradient spoilers: 주기 사이에 다양한 강도의 추가 경사를 가함으로써 Mss를 훼손한다.
- 3) Lengthening TR: TR이 200msec이상으로 충분히 길면 스핀은 완전하게 탈위상화 된다. 실제로 TR이 충분히 길면 경사기법과 훼손경사기법의 차이는 없어진다.

Mss가 제거되기 때문에 훼손경사기법에서는 T2\* 강조가 감소하고 T1 강조가 강화된다. 숙임각이 큰 경우 T1 강조영상을 얻을 수 있고 숙임각이 작은 경우 TE가 짧으면 PD, 길면 T2 영상을 얻게 된다.

SPGR 기법의 단점은, 주자장의 불균질에 의한 탈위상화가 증가, 자기화율인공물 증가, 화학적 변이 인공물 증가 등이 있다.

### (3) Ultra Fast Gradient Echo (Turbo FLASH, Fast SPGR, TFE)

매우 빠른 속도를 얻기 위해서는 ultra short TRs과 TEs를 사용해서 여기, 위상부호화, 주파수부호화 등에 걸리는 sequence time을 단축해야 한다. 이는 fractional echo, fractional RF, fractional NEX, 그리고 sampling time (Ts) 단축 (주파수대역을 증가) 을 통해 달성할 수 있다. 수신된 echo, RF 펄스, 그리고 k-space가 모두 대칭이기 때문에 일부분만 사용하는 것이 가능하다. 이를 통해 TE 감소와 위상부호화 시간이 단축된다. 주파수대역을 2배 증가 시키면 Ts가 1/2로 감소하게 되지만 SNR은 감소한다. TE 감소, 주파수대역 증가로 매우 짧은 TR 사용이 가능해졌다. TR을 길게 하면서 다평면기법을 사용하면 더 빠른 스캔이 가능해진다.

이 기법의 장점은 복부에서 호흡정지영상, 움직이는 관절영상 (TM joint), 심장의 cine imaging, single slice dynamic study, perfusion imaging 등이 가능하다는 것이다.

단점은 TR이 너무 짧기 때문에 SNR, CNR이 낮아지고 (다평면영상으로 극복), 짧은 TE의 사용으로 boundary effect가 증가한다는 것이다.

### (4) Multiplanar Techniques

경사기법에서는 수백 msec의 긴 TR을 사용함으로 다평면 영상을 얻을 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 TR이 매우 길기 때문에 GRASS와 SPGR영상에 거의 차이가 없게 되며, 숙임각과 TE를 조절하여 T1, T2\*, PD영상을 얻을 수 있다.

긴 TR을 사용하면 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 종축자기화가 충분히 회복되므로 SNR이 증가한다. 둘째, 다평면 영상획득이 가능해진다. 셋째, 다에코 영상이 가능하지만 빠른 T2\* 붕괴로 인해 두 번째 에코는 화질이 떨어지게 된다. 넷째, 포화현상을 감소시키기 때문에 큰 숙임각을 갖는 펄스를 사용해서 생기는 포화현상을 상쇄시킬 수 있다. 따라서 큰 숙임각의 펄스를 사용할 수 있어 횡자화가 크게 되고 SNR이 증가한다.

## 참 고 문 헌

1. Hashemi RH, Bradley WG Jr, Lisanti CJ. MRI the basics. 2nd ed. Lippincott Williams & Wilkins, 237-262
2. Brown MA, Semelka RC. MRI basic principles and application. 3rd ed. Wiley-Liss 73-80