

<심포지움-2>

Conventional and Spiral EPI

광운대학교 전기공학과
안 창 범

1. 서론

Echo planar imaging (EPI) 은 1977년 Mansfield에 의하여 제안되었다. (1) Conventional Fourier 영상방법과 달리 전 spatial frequency (k -space) data를 한번에 받을 수 있기 때문에 측정 시간이 100ms 정도로 단축되는 이점이 있으나, 강한 gradient field와 높은 slew-rate를 갖는 amplifier가 요구되고, 심한 eddy current 및 inhomogeneity 관련 artifact의 발생으로 임상적용에는 한계점이 많았다. 이러한 문제점들은 self-shielded gradient coil과 electronics의 발전으로 많이 해결되었으며 특히 최근 활발히 연구되고 있는 Functional MRI (f-MRI)와 관련하여 초고속영상에 더욱 관심이 모아지고 있다.

Spiral 영상기법은 EPI가 가지고 있는 불균일 point spread function과 큰 eddy current를 야기하는 빠르게 반전하는 구형파 모양의 gradient waveform을 개선하기 위하여 제안되었다. (2-3) Spiral 영상기법은 균일 point spread function을 가지며, linearly increasing sinusoidal waveform의 gradient로 구성되어 있어 eddy current의 발생이 현저하게 작고, eddy current가 발생하여도 영상의 회전형태로 나타나기 때문에 쉽게 보정이 가능하다. 또한 혈류와 관련한 위상이 스스로 rephasing 되는 효과가 있어, 심장영상, coronary artery 영상 등에 효율적인 것으로 알려져 있다. (4)

2. Conventional EPI 영상

Mansfield 가 처음 제안한 EPI 의 k -space 궤적은 zig-zag 형태로 재구성하는데 어려움이 있어, 그림 1에서 보인 변형된 Blipped EPI 가 많이 사용된다. Blipped EPI를 구현하기 위한 pulse sequence를 그림 2, 3에 보였다. 실제 EPI 실험에서는 eddy current 때문에 echo가 원하는 위치에 나타나지 않는 경우가 많다.(5-6) 이렇게 되면 data 정렬이 제대로 되지 않아 재구성 영상에 심각한 문제점을 가져온다. 이것을 해결하기 위하여 본 실험에 앞서pre-scan에서 phase encoding gradient 없이 반전하는 readout gradient 만으로 echo를 수집하여 위상보정 (data alignment)을 할 필요가 있다. 이를 위한 EPI 실험의 data 구조를 그림 4에 나타내었고, 위상보정과정을 그림 5에 나타내었다.

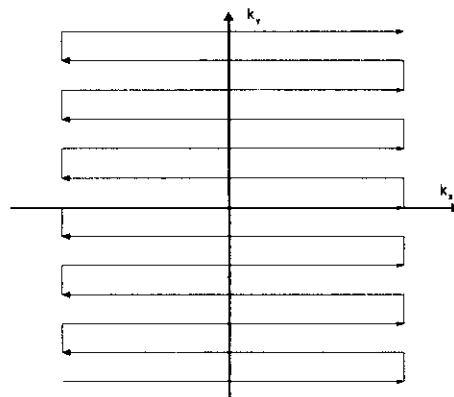


그림 1. Blipped EPI 의 k -space 궤적

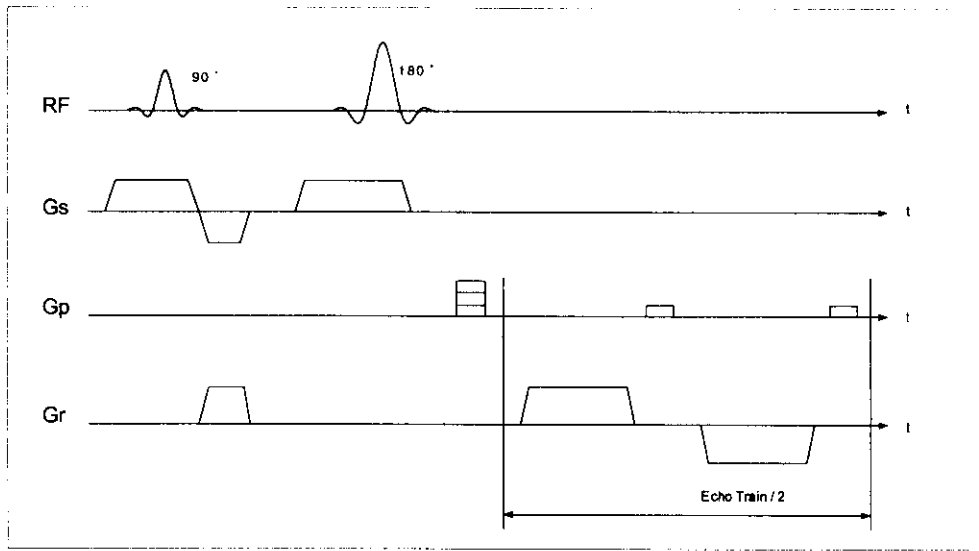


그림 2. Spin Echo를 기본으로 한 EPI pulse sequence

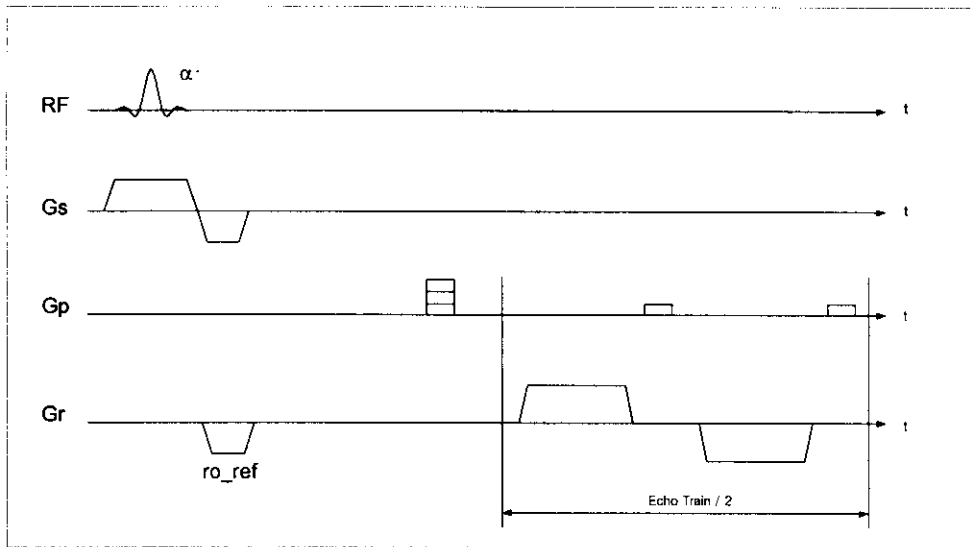


그림 3. Gradient Echo를 기본으로 한 EPI pulse sequence

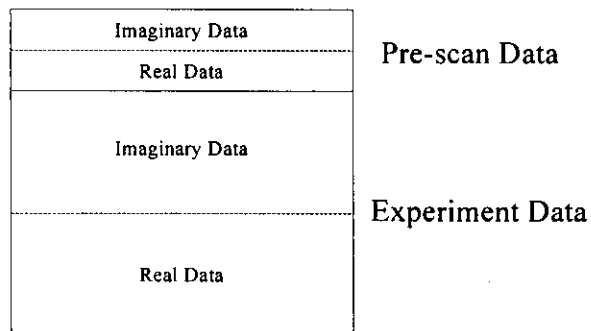


그림 4. EPI data의 구조

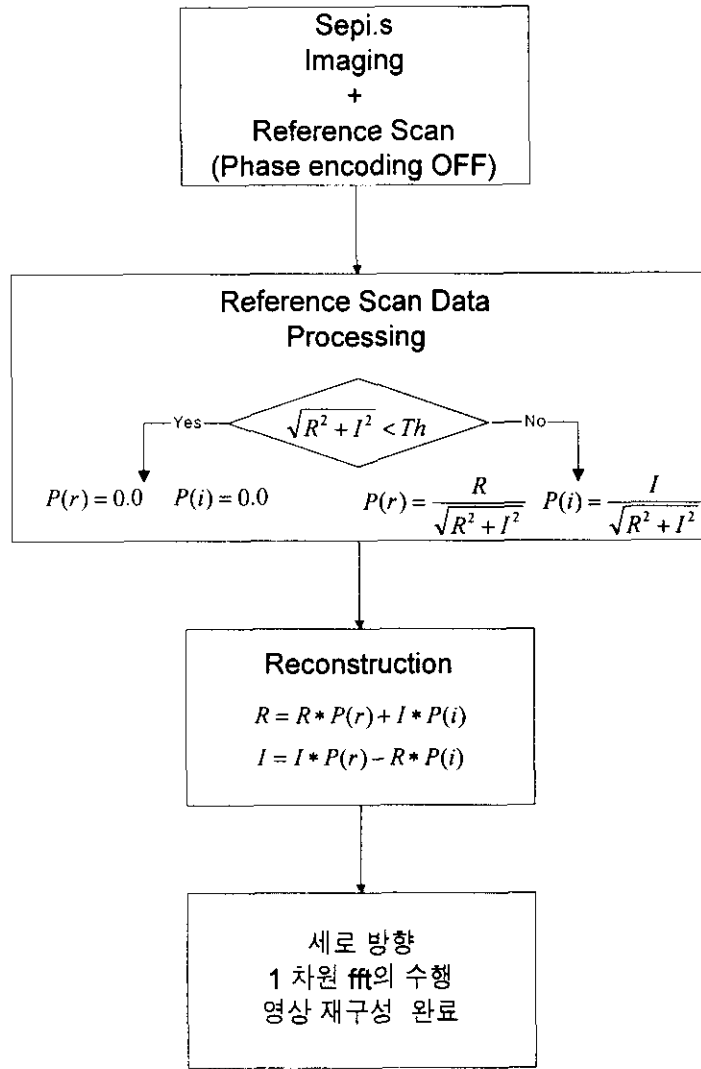


그림 5. EPI data 위상보정 및 영상 재구성

EPI 영상은 gradient echo를 이용하고, data acquisition 구간이 길기 때문에 field inhomogeneity에 매우 민감하다. Inhomogeneity는 main magnetic field 등과 관련한 외부 inhomogeneity와 chemical shift, susceptibility 등과 관련한 내부 inhomogeneity로 나눌 수 있다. Main magnetic field inhomogeneity는 higher order shimming (7)을 이용한 hardware적인 방법이나 field mapping 등을 이용한 software적인 방법으로 개선할 수 있다. Chemical shift artifact를 제거하기 위해서는 먼저 CHESS pulse 등과 같은 preparation pulse를 가하여 fat(water)을 saturation 시킨 후 water (fat)에 대하여 영상을 얻는다.

3. Spiral scan 영상

EPI 영상을 개선하기 위하여 제안된 spiral scan 영상은 k-space에서 spiral 궤적을 갖는다. 그림 6은 일반적인 interleaved spiral scan 영상의 궤적을 나타낸 것이다 (single-shot spiral 영상의 경우 interleaving 횟수가 1이다). Gradient waveform G_x, G_y 는 k-space 변수 k_x 및 k_y 를 미분함으로써 얻어진다. Spiral 영상의 pulse sequence를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 보듯이 gradient field가 linearly increasing sinusoidal waveform으로 되어있어 EPI 영상의 빠르게 반전하는 구형파에

비하여 상대적으로 eddy current를 작게 유발시키는 장점이 있다. 또한 T2 decay에 따른 point spread function 이 isotropic 하다는 특징이 있다. Spiral scan 영상의 재구성은 spiral 궤적과 유사한 polar coordinate에서 filtered backprojection을 이용한 방법(8-9)과 rectangular grid로 interpolation을 한 후 FFT를 통한 재구성 방법이 있다. (10) 그림 8은 polar coordinate에서 재구성하는 과정을 보여주고 있다. 그림 9는 1.0 Tesla conventional whole body MRI 시스템에서 얻은 sinogram 과 재구성 영상들이다.

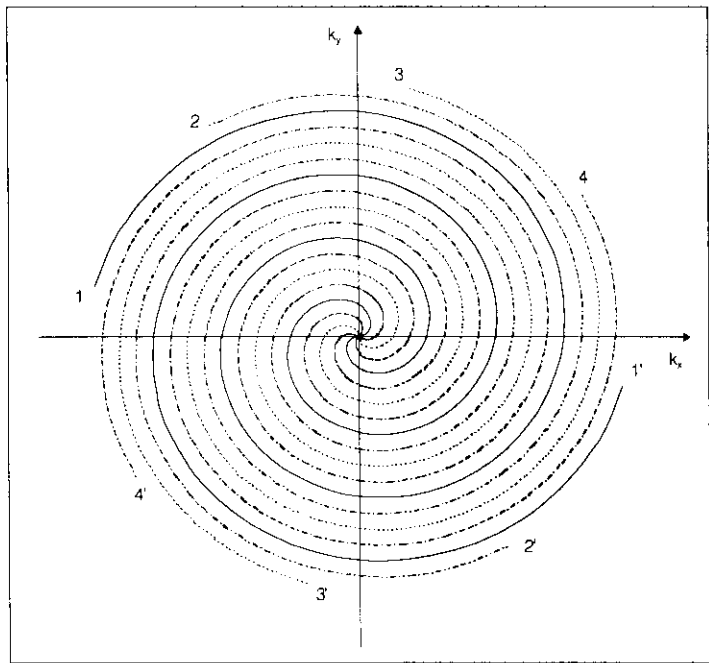


그림 6. Spiral scan 영상의 k-space 궤적

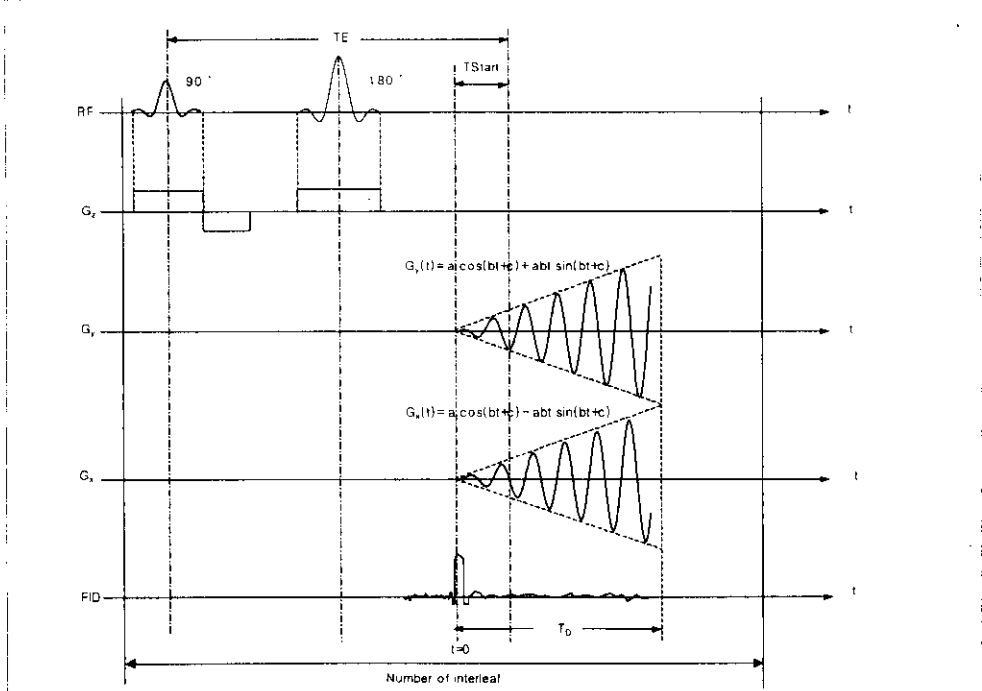


그림 7. Spiral scan 영상의 pulse sequence

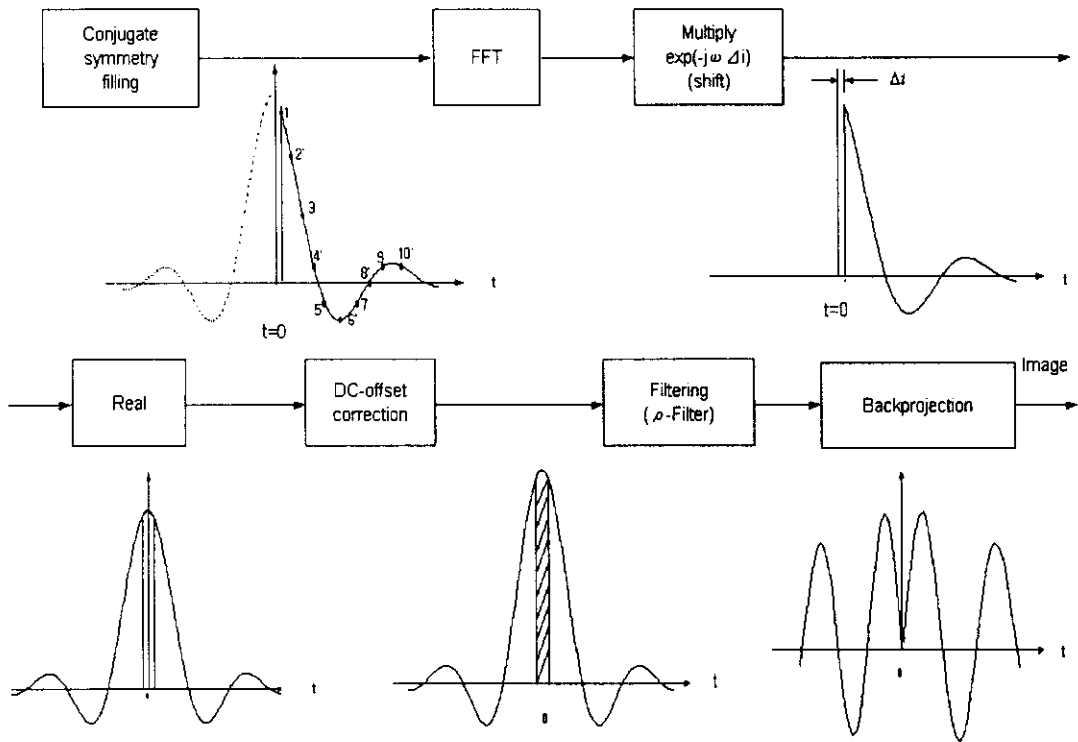
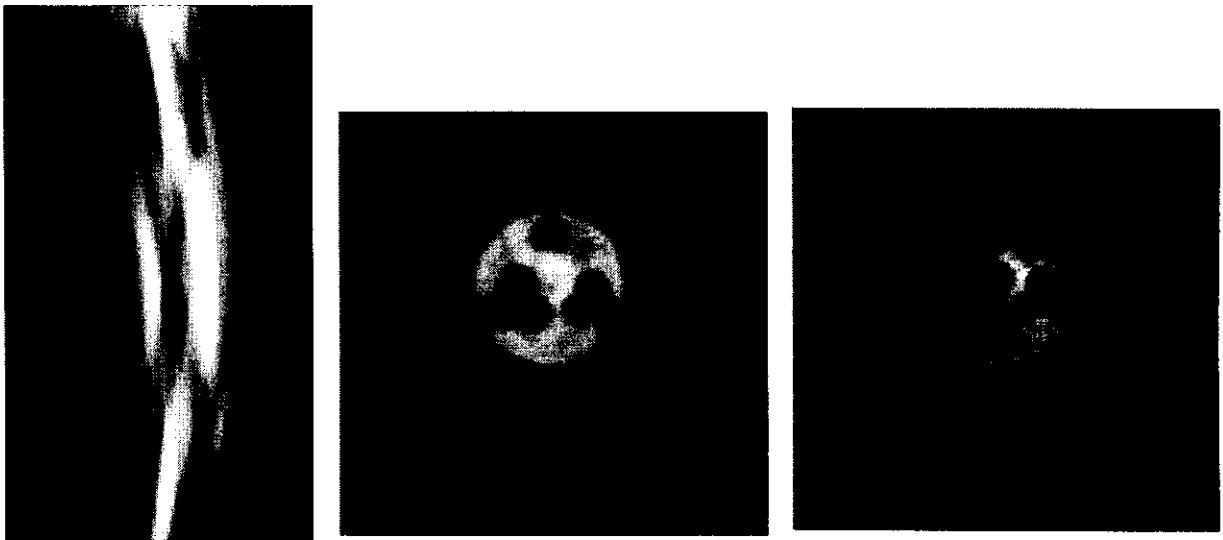


그림 8. Spiral scan 영상 재구성 과정



Sinogram

64x64, single shot

128x128, 4-interleaved

그림 9. 1.0 Tesla whole body system 에서 얻은 spiral scan 영상의 sinogram 및 재구성 영상들

Reference

1. P. Mansfield, "Multi-planar image formation using NMR spin echoes," *J. Phys. C*, vol. 10, pp.155-158, 1977.
2. C.B. Ahn, J.H. Kim, and Z.H. Cho, "High-Speed Spiral-Scan Echo Planar NMR Imaging-I," *IEEE Trans. Med. Imag.* vol.5, pp.1-6, 1986.
3. C.B. Ahn, C.Y. Rew, J.H. Kim, O. Nalcioglu, and Z.H. Cho, *Proc. SMRM*, pp.935-936, 1985.
4. C.H. Meyer, B.S. Hu, D.G. Nishimura, and A. Macovski, "Fast Spiral Coronary Artery Imaging," *Magn. Reson. Med.* vol.28, pp.202-213, 1992.
5. C.B. Ahn and Z.H. Cho, "Analysis of Eddy Currents in Nuclear Magnetic Resonance Imaging," *Magnetic Resonance in Medicine*, Vol. 17, No. (1), pp.149-163, 1991.
6. C.B. Ahn and Z.H. Cho, "Analysis of the Eddy-Current-Induced Artifacts and the Temporal Compensation in Nuclear Magnetic Resonance Imaging," *IEEE Transaction on Medical Imaging*, Vol. 10, No.(1), pp. 47-52, 1991.
7. C.B. Ahn, J.M. Jo and Z.H. Cho, "Magnetic Field Homogeneity Correction Algorithm using Pseudoinversion Formula for NMR Imaging," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 57, No. (4), pp. 683-688, 1986.
8. C.B. Ahn, H.J. Kim, C.H. Oh, and C.Y. Kim, "Reconstruction aspects of spiral scan magnetic resonance Imaging", *Proc. SPIE, Medical Imaging* vol.3336, pp.141-152, 1998.
9. C.B. Ahn, H.J. Kim, C.Y. Kim, W.S. Ryu, D.J. Park, H.K. Lee, C.H. Oh, and Y. Yi, "Comparison of Reconstruction Algorithms for Spiral Scan Imaging," *ISMRM*. vol.3, p.2003, 1997.
10. J. Jackson, C.H. Meyer, D.G. Nishimura, and A. Macovski, "Selection of a convolution function for Fourier inversion using gridding," *IEEE Trans. Med. Imag.* vol.10, pp.473-478, 1991.