

단일 RF 펄스를 사용한 3차원 체적 선택 방법을 이용한 MR 스펙트로스코피

임채열*, 천강욱*, 나종범*, 조장희**

*서울특별시 동대문구 청량리 우체국 사서함 150, 한국 과학 기술원 전기 및 전자공학과

MR spectroscopy using single-shot RF localization technique

C.Y. Rim*, K.W.Chun*, J.B. Ra* and Z.H. Cho**

* Dept. of Electrical Sciences, Korea Advanced Institute of Science,
P. O. Box 150, Cheongyangni, Seoul, Korea.

**Dept. of Radiological Sciences, University of California, Irvine, CA 92717, USA.

ABSTRACT

In last several years, a number of volume localization techniques, such as ISIS, VSE, SPARS and STEAM etc., have been developed for the MR spectroscopy.[1-9] These localizing techniques, however, require application of several RF pulses for the 3-D volume selection and suffer from T1 and T2 decays due to relatively long RF excitation time.

In this paper, we propose a single-shot RF pulse localization technique to achieve the localized 3-D volume selection. This technique combines the cylindrical volume selection technique with a radial gradient coil with single-shot RF pulse and the oscillating selection gradient technique, so that it minimizes the volume selection time.[10-12] We report some experimental results obtained with the proposed method which appears promising for 3-D volume imaging and localized spectroscopy.

본문 요약

지난 몇년동안 생체에서의 MR 스펙트로스코피(Magnetic Resonance Spectroscopy)를 위하여 ISIS, VSE, SPARS, STEAM 등과 같은 여러 체적 선택의 방법이 연구되어 왔다.[1-9] 그러나 이들 3차원 체적 선택의 방법은 여러 RF 펄스를 사용하여야 되었으며 상대적으로 오랜 시간 동안의 RF 여기 시간(Radio frequency excitation time) 때문에 T1 과 T2 감소효과의 영향을 크게 받았다.

본 논문에서는 3차원의 체적을 선택하기 위하여 단일 RF펄스의 사용을 제안하고 있는데, 이 방법은 원통형 체적을 선택하기 위한 방사형 경사 코일(a radial gradient coil) 방법과 진동자계(oscillating selection gradient) 방법을 결합하고 있다.[10-12] 이렇게 하므로 단일 RF 펄스만을 사용하여 체적 선택 시간을 최소화하며 여러 RF 펄스를 사용할 경우 발생하는 파생적인 에코 신호(echo signal)를 피할 수 있었다. 제안된 방법에 의한 실험적 연구결과로서 팬텀(phantom)에 대하여 선택된 체적에 대한 영상과 스펙트럼(spectrum)을 제시하였다.

서론

MR 스펙트로스코피(Magnetic Resonance Spectroscopy)는 생체내에서의 여러 신진대사 물질들(metabolites)와 이온

(ions)들에 대한 정보를 줄수 있다. 생체에서의 기관적 기능을 연구하기 위하여 어떤 관심있는 영역에서의 화학적 스펙트럼(chemical spectrum)을 얻어낼 수 있어야 하는데, 이러한 극부적인 체적을 선택하여 신호를 얻어낼수 있는 체적 선택의 기술이 MR 스펙트로스코피의 매우 중요한 분야로 되어있다. 현재까지, VSE, ISIS, SPARS, DRESS 와 STEAM 등 많은 체적 선택 기술이 개발되어 왔다. [1-9] 그러나 이들은 여러 RF 펄스를 사용하여야 하는 까닭으로 선택되어 지지 않은 영역으로부터 T1 복귀된 신호에 의하여 영향을 받으며, 원치않는 여러 에코들(echoes)로부터 제약을 받고 선택되어진 영역에서는 여기시간(excitation time)이 긴 관계로 T2가 짧은 물질은 모두 사라져 없어지는 단점을 갖고 있었다. 그렇기 때문에 이러한 방법들은 T2가 짧은 물질에 대하여 적절한 방법을 제시하여 주질 못했다.

본 논문에서는 단일 RF 펄스만을 사용하여 여러 원치않는 에코의 발생을 없앨 수 있고, T1 과 T2의 영향에 자유롭게 될수 있는 방법을 제시하였다.

실험방법

최근의 논문에서 방사형 경사 코일을 이용한 새로운 3차원 체적 선택 방법이 소개되었다.[10] 이 경사코일은 그림 1에 나타난 것처럼 원형 고리(circular loop) 형태로 구성되며, 원통형 좌표계(cylindrical coordinate)에서 방사형 경사자계(radial gradient field) Gr 을 생성한다. 결과적으로 방사형 경사자계와 선택적 RF 펄스를 사용함으로써, 하나의 긴 원통모양의 체적이 선택되어 단일의 RF 펄스와 단일의 경사자계로써, 2차원의 체적이 선택되어지는 효과를 얻을 수 있다. 또한 Pauly 와 그의 동료들에 의한 실험결과에서 보듯이 두개의 진동 경사자계를 이용하여, 하나의 RF 펄스에 의해 2차원의 체적이 선택됨을 볼 수 있다.[11] 그러나 그들의 실험에서는 실제적인 시스템에서의 경사자계에 필요한 전력의 한계로 인하여 2차원의 체적선택으로 제한된다.

본 논문에서는 두가지의 체적선택 방법 즉, 방사형 경사자계를 이용한 2차원 체적 선택 방법과 Pauly 에 의한 두개의 진동형 경사자계를 이용한 2차원 체적 선택 방법을 조합함으로써, 단일의 RF 펄스로 3차원 체적을 선택할 수 있는 방법을 제안하는 바이다.

실제적인 방사형 경사자계를 생성하기 위해서는, 방사형 경사자계 코일은 원형코일(circular loop) 형태의 코일과 Helmholtz 형태의 coil 에 의해서 구성되며, Helmholtz 형태의 코일은 원형 코일에 의해 생기는 z=0 평면에서의 오프셋자계(offset field)를 제거하는데 이용된다. 방사형 경사자계 코일에 의해 생성되는 자계의 z- 성분은 $B_z(r, \phi, z) = Gr \cdot r^2$ 로 표시되며, Gr 은 방사형 경사자계의 세기를 나타낸다. Bz 에 대한 적당한 근사 형태를 취하면 아래의 식과 같은 선형적인 관계로 표시 할 수 있다.

$$B_z(r, \phi, z) = Gr \cdot r. \quad (1)$$

방사형 경사자계가 존재할때 선택적 RF 펄스를 가해주면, 지름이 L2 인 원통형 체적이 선택되어 질 수 있는데, 이때 방사형 경사자계의 크기 Gr 과 RF 펄스의 대역폭 BW 의 관계는 다음과 같이

$$L2 = BW/\gamma Gr, \quad (2)$$

로 나타내어 진다. 여기서 γ 는 magnetogyric ratio 이다. 방사형 자계에 의한 원통형 체적선택에 대한 내용이 그림 1 에 도시되었다. 연속된 선택적 RF 펄스를 계속해서 가하므로 얇은 슬라이스(slice)가 선택되어 질 수 있으며 영상화 될 수 있다.

Pauly 등은 2차원적인 체적이 두가지의 진동 자계들(oscillating gradients) 을 가하므로 얻어질 수 있음을 보였으나 이 방법을 3차원적인 체적 선택의 방법으로 적용하려 할때 보통 사용하는 x,y,z 경사자계만을 갖고서는 매우 큰 파워앰프(power amplifier) 가 필요하게 되므로, 3차원적인 선택의 방법으로 확장하기에는 많은 문제점을 갖고 있었다. 그러나 본 논문에서는 그러한 문제점을 제거하기 위하여, 3차원적인 체적을 선택하려 할때 보통의 x, y, z 경사자계를 사용하는 방법을 바꾸어서 방사형 경사자계와 z 경사자계를 이용하였고, 이렇게 하므로써 3차원적인 체적 선택을 2차원적인 공간에서 해석하고 구현할 수 있게 하였다.[11] 진동자계를 이용하여 체적이 선택되는 과정을 수식으로 살펴보면 다음과 같다.

회전 좌표계(rotating frame)에서 Bloch 방정식은 작은 팁 각도(tip angle) 근사식에 의하여, 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\frac{dc(t,r)}{dt} = i\omega_h(t,r)c(t,r) + \gamma H_1(t)\rho(r). \quad (3)$$

여기서 $c(t,r)$ 은 x,y 평면에서의 자화를 나타내며, $\rho(r)$ 은 위치 r 에서 평형자화의 크기를 나타낸다. $\omega_h(t,r)$ 는 화학적 이동(chemical shift) 또는 경사자계(gradient field) 또는 자계 불균일(field inhomogeneity) 에 의한 주파수 성분을 나타내고, $H_1(t)$ 는 RF 자계를 나타낸다. 그리고 식(3)에서는 RF 를 가하는 동안 T1,T2 relaxation 을 무시하였다. 1차 미분 방정식(3)를 풀어보면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c(t_A, r) = i\gamma\rho(r)\exp(i\int_0^{t_A} \omega(t',r)dt') \int_0^{t_A} \exp(-i\int_0^t \omega_h(t',r)dt') H_1(t) dt. \quad (4)$$

여기서 $\omega_h(t,r)$ 의 경사자계 항이 가장 크므로 다른 항을 무시하면 식(4)는 다음과 같이 변수 $k(t)$ 를 사용하여 정리 된다.

$$c(t_A, r) = i\gamma\rho(r)\exp(ik(t_A)\cdot r) \int_0^{t_A} \exp(-ik(t)\cdot r) H_1(t) dt, \quad (5)$$

$$k(t) = \int_0^t \omega_h(t') dt' = \gamma \int_0^t G(t') \cdot r dt'.$$

여기서 $G(t)$ 는 가해진 경사자계의 크기이다. 위식의 적분식이 변수 t 에 관하여 표현되고 있는데 이것을 변수 $k(t)$ 에 관한 적분식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\int_0^{t_A} H_1(t) \exp(-ik(t)\cdot r) dt = \int_{k_{\text{dmin}}}^{k_{\text{dmax}}} \frac{H_1(t)}{|k(t)|} \exp(-ik(t)\cdot r) \frac{k(t)}{|k(t)|} dk, \quad (6)$$

$$k(t) = \frac{dk(t)}{dt}, \quad dt = \frac{1}{|k(t)|} \cdot \frac{k(t)}{|k(t)|} \cdot dk.$$

여기서 $|k(t)|$ 는 속도의가중치를 나타내고 $k(t)/|k(t)|$ 는 속도의 정규벡터(velocity normal vector)를 나타낸 것이다. 식(6)의 적분은 선택되어진 체적과 가해진 RF 펄스의 Fourier transform 의 관계를 표현하고 있다. 즉 우리가 RF 펄스를 Gaussian 모양이나 sinc 모양으로 가해진 경우 선택되어진 체적의 선택도(selectivity)는 RF 펄스(RF pulse)의 Fourier 변환된 Gaussian 이나 rectangular 모양이 되어질 것으로 알 수 있다. RF 펄스(RF pulse) $H_1(t)$ 를 k-공간에서 샘플링(sampling) 하여 가해주는데 k-공간을 나선형 궤적(spiral trajectory)을 따라서 유니폼(uniform)하게 샘플링하여 가하여 주게 된다. k-공간의 나선형 궤적은 다음과 같이 쓸 수가 있는데 [12]

$$k_x(t) = \gamma \int_0^t G_x(t') dt' = \gamma A \left(1 - \frac{t}{t_A}\right) \cos\left(\frac{2\pi N}{t_A} t\right) \quad (7)$$

$$k_z(t) = \gamma \int_0^t G_z(t') dt' = \gamma A \left(1 - \frac{t}{t_A}\right) \sin\left(\frac{2\pi N}{t_A} t\right)$$

이다. 여기서 A 는 크기 상수이고 N 은 라선의 회전수이며 t_A 는 궤적을 그리는데 걸리는 시간이다. 속도의 가중치는 다음과 같이 구할 수 있는데,

$$|k(t)| = \frac{A}{t_A} \sqrt{1 + (t_A - t)^2} \quad (8)$$

이다.

제한된 3차원 체적 선택방법을 이용한 펄스순서(pulse sequence)는 그림 3에 나타나 있다. 두개의 나선형 진동 경사자계는 Gr, Gz 에 각각 주어져 있으며, 코딩은 Gx 경사자계로서 이루어진다. 진동 자계 방법에서는 근본적으로 재집중(refocus) 특성이 내재하므로 재집중 선택 경사자계를

이용할 필요가 없는 장점이 있고, 우리가 사용한 펄스 순서는 SSFP 또는 FLASH 와 같은 고속 영상기법을 이용할 수 가 있다.

3차원 체적 선택 방법을 사용한 스펙트로스코픽 펄스 순서 (spectroscopic pulse sequence) 는 그림 3 에 나타나 있는 3차원 체적 영상 기법에서 리딩(reading) 과 코딩(coding) 경사자계를 제거한 형태가 된다. FID (Free Induction Decay) 의 Sampling 시간 간격은 아래식과 같은 스펙트럼 분해능에 의해서 결정된다.

$$\text{Sampling 시간 간격} = 1/(\text{스펙트럼 분해능}) \quad (9)$$

스펙트로스코픽 sequence 는 짧은 에코시간을 가짐으로써, 관심있는 영역 (ROI) 의 스핀들은 T2 감소효과를 거의 받지 않은 상태에서 FID 신호를 받을 수 있다.

실험결과

방사형 경사자계코일의 반경은 25cm로 제작되었으며, KAIS 2.0T MRI 시스템에서 실험되었다. 그림 3 의 펄스 순서 (pulse sequence) 와 같이 제안된 방법으로 체적 선택을 시도하였으며, 그림 4 (a) 에 물이 FAT 를 둘러싸고 있는 모양의 편평을 나타내었는데, 실험에서는 중심부분의 작은 체적 선택을 시도하였다. 그림 4 (b) 에 편평의 3.5 cm x 2.5 cm 의 선택된 체적의 측면에서 본 영상을 나타냈으며 제안된 방법에 의해서 체적이 명확하게 선택됨을 보여주고 있다.

그림 5 (a) 에 편평의 전체 체적으로부터 얻은 스펙트럼과 그림 5(b) 에 선택된 체적으로부터의 스펙트럼, 그리고 그림 5 (c) 는 FAT 만으로 구성된 분리된 편평에서 얻은 스펙트럼을 나타내었다. 각각의 스펙트럼에서 알 수 있듯이 제안된 방법은 스펙트럼의 입그러짐이 없이 체적을 깨끗하게 선택할 수 있음을 알 수 있다.

결론

진동경사자계를 나선적으로 주사함으로써, 새로운 3차원 체적 선택기법을 구현하였다. 이 방법에서는 진동경사자계와 함께 하나의 RF펄스만을 사용함으로써, 순간적인 국부 체적선택이 가능하며 이로인하여 불필요한 T1 과 T2 감소효과를 겪지 않으며 불필요한 에코들의 영향도 받지 않았다.

참고문헌

- [1]. D.R.Bailes, D.J.Bryant, H.A.Case, A.G.Collins, I.J.Cox, A.S.Hall, R.R.Harman, S.Khenia, P.Mcarthur, B.D.Ross, and I.R.Young, J. Magn. Reson., 77, 460(1988).
- [2]. R.J.Ordidge, A.Connelly, and J.A.B.Lohman, J. Magn. Reson., 66, 283 (1986).
- [3]. A. Haase, Magn. Reson. Med., 3, 963 (1986).
- [4]. P.A. Bottomley, T.B.Foster, and R.D.Darrow, J. Magn. Reson., 59, 338 (1984).
- [5]. W.P.Aue, S.Muller, T.A.Cross, and J.Seelig, J. Magn. Reson.,

56, 350(1984).

- [6]. D.M.Doddrell, W.M.Brook, J.M.Bulsing, J. Field, M.G.Irving, and H.Baddeley, J. Magn. Reson., 68, 367 (1986).
- [7]. P.R.Luyten, A.J.H.Marien, B.Syisma, and J.A.Den Hollander, J. Magn. Reson., 67, 148 (1986)
- [8]. D.J.Jensen, P.A.Narayana, and J.L.Delayre, Med. Phys. 14, 38 (1987)
- [9]. J.Frahm, K.D.Merboldt, and W.Hanicke, J. Magn. Reson., 72, 502(1987)
- [10]. S.Y.Lee, and Z.H.Cho, in press in Magn. Reson. Med.
- [11]. J.Pauly, D.Nishimura, and A.Macovski, J. Magn. Reson., 81,43, (1989).
- [12]. C.B.Ahn, J.H.Kim, and Z.H.Cho, IEEE Tran. Med. Imag. MI-5, No.1, 1, (1986).

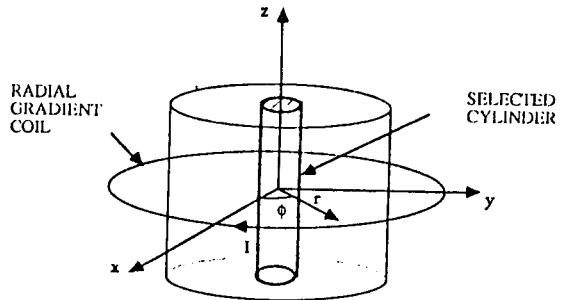


그림 1. 방사형 경사자계 코일 (radial gradient coil) 에 의하여 선택되어진 원통형 체적의 모양

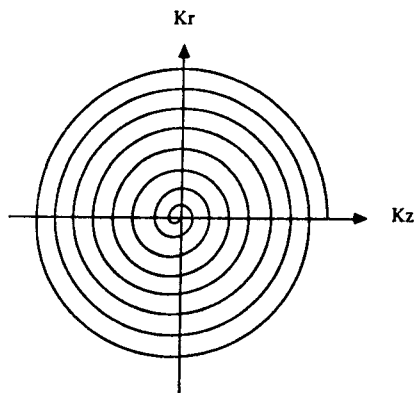


그림 2. k-공간을 유니폼(uniform)하게 샘플링하는 나선형 궤적 (spiral trajectory)

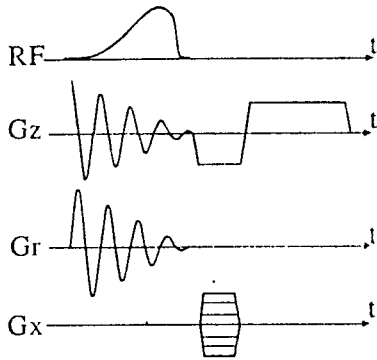
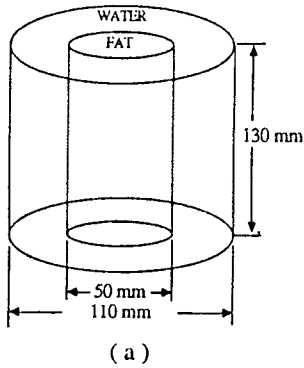
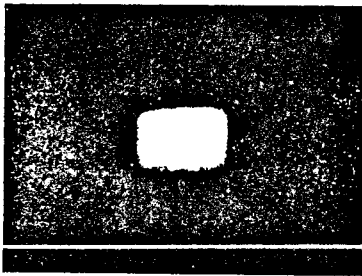


그림 3. 단일 RF 펄스를 사용하여 3차원 체적을 선택하기 위한 펄스순서 (pulse sequence)



(a)



(b)

그림 4. (a) 실험에서 사용된 원통형 팬텀 (phantom) 으로 FAT 물질이 물에 둘러싸여 있다.
(b) 3.5 cm x 2.5 cm(diameter x height) 로 선택되어진 체적의 코로날 영상 (coronal image)

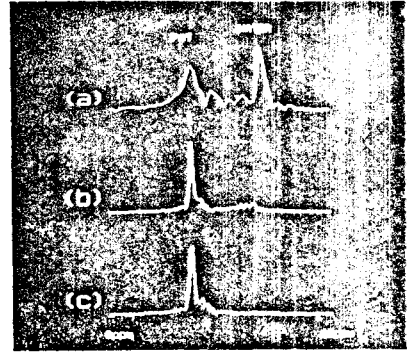


그림 5. (a) 전체 샘플로부터 얻어진 스펙트럼 물과 FAT의 두 신호가 모두 보인다.
(b) 선택되어진 체적으로부터 얻어진 스펙트럼 FAT의 신호만 보인다.
(c) 분리된 FAT 샘플로부터 얻어진 스펙트럼