

자기공명영상에서의 스핀 시각화

조상철, 강승원, 전수열, 임현진, 김판기, 안창범
VIA 멀티미디어 센터, 광운대학교

Spin Visualization for Magnetic Resonance Imaging

S.H. Cho, S.W. Kang, Y.S. Jeon, H.J. Lim, P.K. Kim, C.B. Ahn
VIAME Multimedia Experts, Kwangwoon Univ.

Abstract - MR imaging에서 RF pulse에 의한 Spin들의 이동과 dephase, rephase 되는 모양을 Spin visualization을 사용하면 직관적으로 이해할 수 있다. 다양한 각도의 RF pulse가 여러 번 가해지면, spin echo 외에도 stimulated echo, "eight-ball" echo 등이 나타나기 때문에 직관적으로 echo들을 이해하기가 어려워진다. Spin에 RF pulse가 가해졌을 때, 기존의 2차원의 Profile로 spin들의 상태를 보는 것보다 3차원 공간상에서 spin들의 상태를 살펴봄으로써, 좀 더 쉽게 MR 신호를 이해할 수 있다. 특히 고자장에서 SAR 문제 때문에 낮은 각도의 RF pulse를 사용하여 영상을 해야 하기 때문에 spin visualization은 새로운 영상 방법을 이해하거나 디자인하는데 중요하다.

1. 서론

모든 원자핵은 양성자와 중성자로 구성되어 있다. 양성자는 전하를 띠고 있는 반면에 중성자는 전하를 띠지 않는다. 가장 간단한 형태이며 인체가 가장 많이 있는 양성자는 수소의 원자핵이다. 수소는 단 한 개의 양성자로 구성되어 있다. 양성자와 중성자 모두는 축을 중심으로 자전을 하며 이를 스핀이라고 한다. 지구팽이나 지구의 자전운동처럼 회전운동을 하고 있다.

운동하는 회전물체는 그 주위에 자기장을 형성한다. 그 운동이 스핀운동일 때, 이를 자기 쌍극자라고 한다. 따라서 양성자는 두 개의 극을 가진 이극자적이다. 이것은 마치 남극과 북극을 가진 자석과 같다고 할 수 있다.

본 논문에서는 인체의 수소의 원자핵(양성자)이 외부자기장에 대하여 어떻게 반응하는지 Spin visualization을 활용하여 자기공명현상을 이해하는데 도움이 되고자 한다.

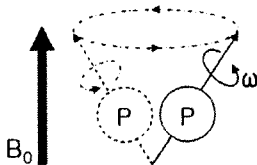
2. 본론

2.1 Spin

인체 내에 있는 많은 원자중에 제일 많은 구성 성분은 수소이며 주로 물의 형태로 약 80%를 차지하고 있다. 수소는 한 개의 양성자(프로톤, proton)를 중심으로 MRI장치 내의 강한 자장 안에서 한 개의 전자가 선회운동을 하고 있으며 팽이와 같은 회전운동을 한다는 의미에서 스핀(spin, 각운동량)으로 부르지만 총 양전하(net positive charge)로 회전하는 질량은 작은 자기 모멘트를 갖는데 이를 스핀(Spin)이라 한다. 프로톤은 전하가 있고 자전하며 동시에 질량이 있어서 작은 막대 자석으로 볼 수 있다. 프로톤 막대 자석은 외부에서 자석이 접근하지 않는 한, 자유로운 방향을 취하고, 즉 제멋대로 놓여 있다. 따라서, 전체 혹은 단위 부피에 있는 수 많은 프로톤 막대 자석의 자기 총합은 0이다. 여기에 강력한 MRI의 자장 B_0 을 걸면 프로톤들은 B_0 와 같은 방향으로 정렬한다. 스핀은 세차운동을 하며 그 회전의 주기는 자장의 크기에 따라 달라지며 자장이 일정하다면, 항상 같은 주기(같은 속도 즉 같은 주파수)로 세차운동을 하고 있다. 스핀은 외부 자장 주위를 세차운동을 하며 이 세차운동을 하는 회전 속도 주파수 ω 는 라모방정식(Larmor equation)으로 표현된다.

$$\omega = \gamma B_0$$

ω : 라모주파수(단위 MHz), γ : 자기회전비 (gyromagnetic ratio, 단위:MHz/Tesla)



<그림 2-1> Spin의 세차운동

2.1.1 Spin & SAR

MR Imaging은 인체에 무해하다. 하지만 고자장에서 SNR이 좋은 MR Imaging을 하기 위해서는 전자파 흡수율(SAR, W/kg)을 고려하여 RF Pulse를 디자인 하여야 한다. 이는 자장이 높아질수록 인체에 흡수되는 단위질량 당 에너지 비율이 높아진다.

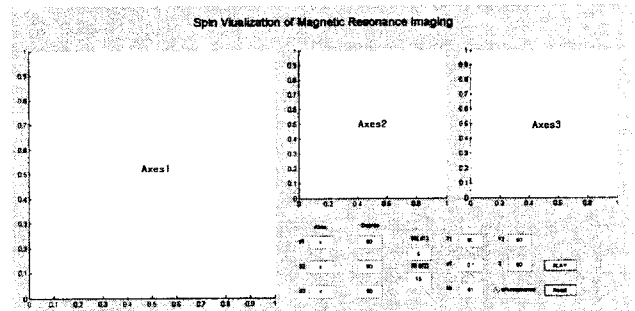
$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right)$$

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{2\rho} (W / kg)$$

B_0 와 E 가 Maxwell's equation에 의하여 비례($B \propto E$)하므로, B_0 가 1.5T에서 3.0T로 2배 증가하면 SAR는 제곱승수배 증가 하게 된다. RF Pulse의 대부분의 에너지는 열의 형태로 소모되며, 이는 인체의 조직을 손상시키므로 MR Imaging에서 법으로 허용된 SAR범위 하에 새로운 영상 Pulse를 디자인 하여야 한다.

2.2 Spin Visualization

MR imaging에서 RF pulse에 의한 Spin들의 이동경로와 dephase, rephase 되는 모양을 Spin visualization을 사용하면 직관적으로 이해할 수 있다. 개발한 Spin Visualization은 Matlab 7.1을 사용하였다.



<그림 2-2> Spin Visualization Tool

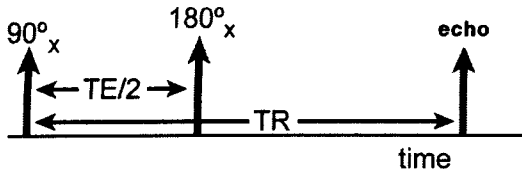
2.2.1 Parameter Setting.

RF Pulse를 최대 3번까지로 한정, RF Pulse를 가할 수 있는 3개의 xyz 축, 각 RF Pulse의 가하는 각도, 각 RF Pulse간의 interval time, T1, T2 time 설정, off-resonance에 의한 영향, 총 측정시간, Spin의 개수를 입력하고 Play button을 클릭하면 실행된다.

Axis1은 Spin들의 전체 움직임을 표시, Axis2는 X-Y 벡터평면에서의 Spin들의 움직임을 표시, Axis3은 X-Z 벡터평면에서의 Spin들의 움직임을 표시하였다.

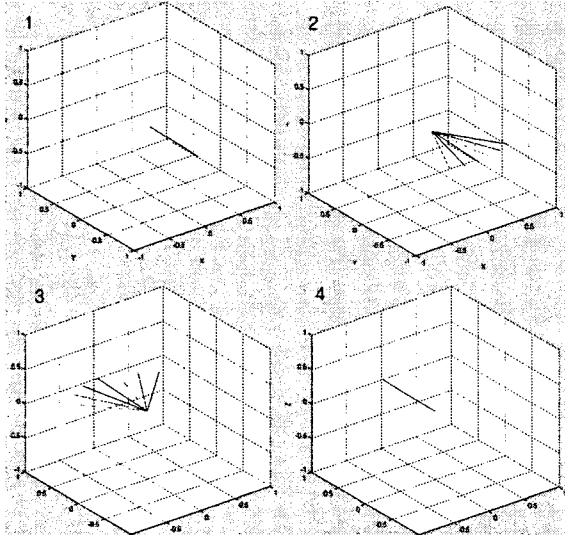
2.2.2 Spin echo

Spin echo는 그림 <그림 2-3>과 같이 90도 180도 Pulse를 가하여 FID를 측정한다. Spin echo 기법은 off-resonance에 의하여 dephase된 Spin들도 180도 Pulse에 의하여 모두 rephase되는 것이 장점이다. 기존의 그림 <그림 2-3>과 같이 profile형식의 표현보다 <그림 2-4>와 같이 Pulse에 의한 3차원공간에서의 분석이 직관적으로 Spin을 이해하는데 도움이 된다.



<그림 2-3> Spin echo profile

<그림 2-4>는 90도 Pulse를 가한 후 Net Magnetization이 XY 평면상으로 놓게 된다. TE/2시간만큼의 시간동안 세차운동을 하여 각각의 Spin들은 dephase된다. 180도 Pulse를 가하면 각각의 Spin들의 속도가 틀리고 180도 회전 후 4번과 같이 rephase된다. 이때의 echo가 가장 크다.



<그림 2-4> Spin echo Simulation

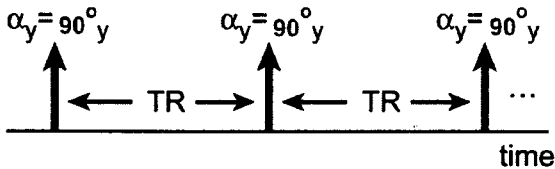
Axis	Degree	TR (#1)	T1	T2
#1 x	90	5	80	50
#2 x	180	TR (#2)	0.1	T
#3 y	0	15	61	60

© off-resonance

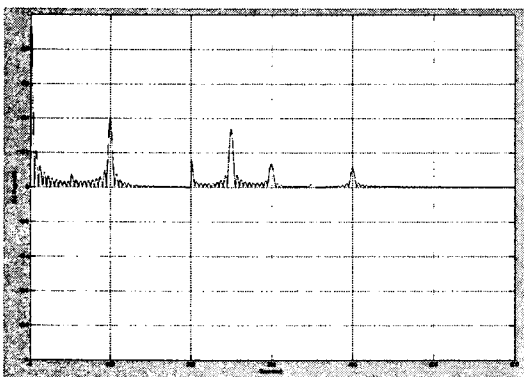
<그림 2-5> Spin echo Parameter

2.2.3 Three-Pulse echoes

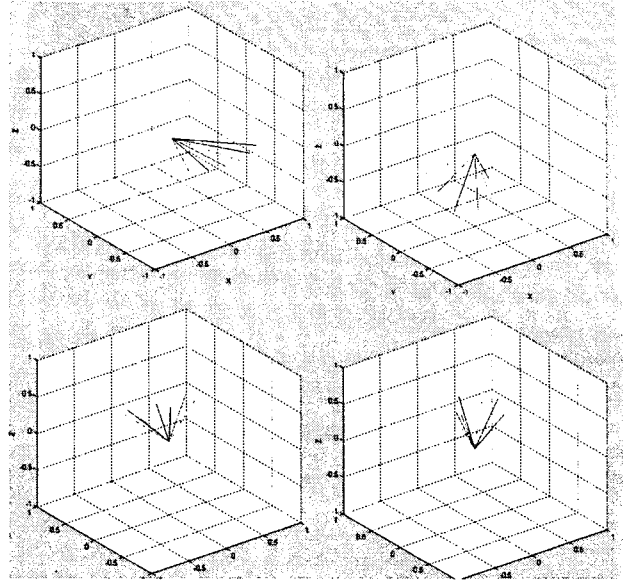
그림 2-6과 같이 3개의 Pulse를 주면 그림 2-7과 같이 stimulated echo 와 "eight-ball"echo 가 나타난다.



<그림 2-6> Three-Pulse echoes



<그림 2-7> stimulated echo & "eight-ball"echo



<그림 2-8> Three-Pulse echoes Simulation

3. 결 론

MR imaging에서 RF pulse에 의한 Spin들의 이동경로와 dephase, rephase 되는 모양을 Spin visualization을 사용하여 직관적으로 이해할 수 있다. 다양한 각도의 RF pulse 가 여러 번 가해지면, spin 들이 어떻게 회전을 하는지 알 수 있으며, 원하지 않는 곳에서의 echo들이 발생함을 3차원공간에서 이해할 수 있다. MR Imaging은 인체에 무해하다. 하지만 고자장에서 MR Imaging을 하기 위해서는 전자과 흡수율(SAR, W/kg)을 고려하여 RF Pulse를 디자인 하여야 한다. 이는 자장이 높아질수록 인체에 흡수되는 단위질량 당 에너지 비율이 높아진다. B_0 와 E가 Maxwell's equation에 의하여 비례($B \propto E$)하므로, B_0 가 1.5T에서 3.0T로 2배 증가하면 SAR는 제곱 승수배 증가 하게 된다. RF Pulse의 대부분의 에너지는 열의 형태로 소모되며, 과도할 시 인체의 조직을 손상 시킬 수 있으므로 MR Imaging에서 범으로 허용된 SAR범위 하에 새로운 영상 Pulse를 디자인 하여야 한다. 낮은 각도의 RF pulse를 사용하여 영상을 해야 하기 때문에 spin visualization은 새로운 영상 방법을 이해하거나 디자인하는데 중요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] ZHI-PEI LIANG, PAUL C. LAUTERBUR, "Principles of Magnetic Resonance Imaging-A Signal Processing Perspective", SPIE PRESS.
- [2] Matt A. Bernstein, Kevin F.King, Xiaohong Joe Zho,"HANDBOOK OF MRI Pulse Sequence", ELSEVIER ACADEMIC PRESS.