Local Linearity Assumption을 이용한 Spin Echo용 RF Pulse의 최적화 (Optimization of Spin-Echo RF Pulse Waveform Using Local Linearity Assumption)

김사라, 이덕래, 오창현

고려대학교 대학원 전자 및 정보공학과

목적: 본 논문의 목적은 선택성 및 RF Power등의 제한자를 사용한 Spin Echo용 Slice-selective 180° RF Pulse의 최적화이다. Selective RF Pulse의 최적화는 Bloch Equation의 비선형성 때문에 많은 어려움이 있다. 작은 숙임각에 대해서는 Fourier Analysis를 이용한 Small Tip-angle Method를 이용하여 좋은 Profile을 가진 펄스를 설계할 수 있지만 큰 숙임각에 대해서는 적용할 수 없다. 본 논문에서는 큰 숙임각에서도 적용이 가능하고 선택성 및 RF Power등의 제한을 줄 수 있는 RF 펄스 설계방법을 제시하였으며 제안된 방법의 유용성을 Spin Echo용 180° 펄스를 구현함으로 보였다.

대상 및 방법: 그 동안 큰 숙임각에서도 좋은 선택성을 가지는 RF 펄스를 최적화하기 위한 많은 방법이 제시되었다. 최근에는 Spin Domain의 Bloch Equation을 이산적인 근사방법을 사용하여 Digital Filter 설계방법을 도입한 Shinnar-Le Roux방법 등이 제시되었다. 본 논문에서는 Profile을 최적화하기 위해 RF펄스의 Fourier Series를 사용하였다. Bloch Equation을 풀면 Slice Profile[M_{xy}]과 RF 펄스[B_1]와의 관계는 아래와 같다.

$$\frac{dM_{xy}}{dt} = -\gamma(\vec{G}\cdot\vec{r})M_{xy} + j\gamma B_1 M_z, \quad \frac{dM_z}{dt} = \gamma(B_{1y}M_x - B_{1x}M_y) \qquad (1)$$

여기서 $B_1 = B_{1x} + jB_{1y}$이다. 위 식에서 RF펄스를 Fourier Series로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_1(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \qquad (2)$$

위의 두 식에서 식(2) 즉 RF펄스의 Fourier Series를 변화하여 RF펄스의 모양을 변화시키면 결과적으로 식(1)의 Slice Profile이 변하게 된다. 변경된 Profile의 In-slice영역과 Out-of-slice영역을 이상적인 Slice Profile과 비교하여 그 Error값을 구할 수 있다. 이때 이 Error의 Weighted Sum과 주어진 조건이 최소가 되도록 점진적으로 Fourier Series의 계수를 변화시키면서 RF 펄스를 조절하면 주어진 조건에서의 좋은 Profile을 얻을 수 있다.

결과: In-slice영역과 Out-of-slice영역에 대한 Error를 각각 α, β라고 정의하여 α, β그리고 RF 펄스의 Side Lobe의 개수와 Maximum Power를 제한자로 사용하였다. Side Lobe의 개수를 2, 3, 4, 5, 6, 7로 제한하여 각각의 경우에 대해 좋은 Slice Profile을 반영하는 Spin-echo 180° RF Pulse를 얻을 수 있었다.

결론: 새로운 형태의 RF Pulse의 설계방법을 제안하였으며 Spin-echo용 180° 펄스의 설계로 그 유용성을 확인하였다.

감사의 글 : 본 연구는 (주) 메디슨과 보건복지부의 도움으로 수행되었음.