

Echo 배치의 최적화 및 Filtering을 통한 Fast Spin Echo 영상 개선

김치영, 안창범
광운대학교 전기공학과

Enhancement of Fast Spin Echo Imaging using Optimal Echo Arrangement and Filtering

C. Y. Kim and C. B. Ahn

Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University

서론

Fast Spin Echo 영상^[1]은 종래의 MR 영상이 한 repetition time에 한 줄의 k-space 데이터를 받는 것과 달리, multiple spin echo를 이용하여 여러줄의 k-space 데이터를 받음으로써 실험시간을 4~8배 정도 단축시켜주는 획기적인 방법이다.

Fast Spin Echo 영상에서는 각각의 에코를 k-space상에 어디에 배치하느냐에 따라서 영상의 콘트라스트를 다르게 얻을 수 있다. 따라서 k-space에서의 에코의 배치가 T1-weighted 영상 또는 T2-weighted 영상을 결정하게 된다.

본 논문에서는 k-space상에서 에코의 배치^[2]가 재구성 영상에 미치는 영향을 연구하였다. 3가지 에코 배치 방법을 제안하였고, 시뮬레이션과 실제 실험을 통하여 검증해 보았다. 또한, 에코 크기를 측정하여 역필터링을 함으로써 재구성 영상의 질을 더욱 향상시켰다.

시뮬레이션에서는 에코 8개를 제안한 방법들로 k-space상에 배치한 후 zero appended FFT를 하여 point spread function(PSF)을 계산하였다. 제안된 각각의 방법에 대하여 ripple의 크기와 해상도에 영향을 주는 메인 로브의 폭(FWHM)을 비교하였다.

실험은 국산 MRI 장비(Magnum, 1.0 Tesla)를 이용하여 제안한 방법들 각각에 맞게 8개의 에코를 동시에 얻어, k-space에 배치하였고, 4번째 에코를 effective echo로 하여, 영상을 얻었다.

시뮬레이션 및 실험을 통하여 에코 크기의 차이가

최소가 되는 에코의 배치가 ripple을 최소화시켜 Gibb's artifact등이 작게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 제안한 방법에 대해 필터를 적용하여 더욱 향상된 재구성 영상을 얻을 수 있었다.

Fast Spin Echo

Fast Spin Echo는 Spin Echo를 고속영상기법으로 변환시킨 방법이다. 일반적인 FSE 펄스 시퀀스는 180° rf 펄스가 가해질 때마다 서로 다른 phase encoding gradient를 가하여 k-space를 채우게 된다. 이와 같이 계속되는 180° RF 펄스에 의하여 발생하는 에코의 수를 echo train length(ETL)라 한다.

FSE에서의 촬영 시간은 $[TR \times NEX \times \text{phase encoding의 수} / ETL]$ 가 된다. 연속적으로 발생하는 에코신호의 강도는 T2 decay에 따라 점점 작아지게 되며 이 때 phase encoding gradient의 배열을 어떻게 하는가에 따라서 영상의 대조도는 크게 변화한다. k-space의 중심부(dc)가 영상의 대조도를 결정하며, k-space의 중심부에 해당하는 에코의 시간을 effective echo time이라 한다.

Fast Spin Echo 구현

본 논문에서 사용한 펄스 시퀀스를 그림 1에 나타내었다.

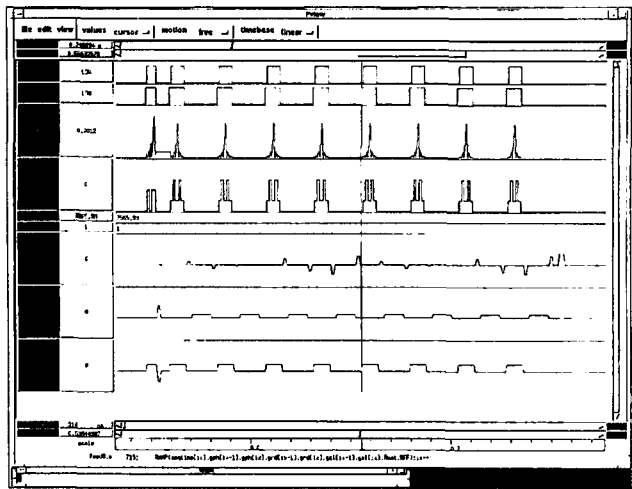


그림 1. FSE pulse sequence

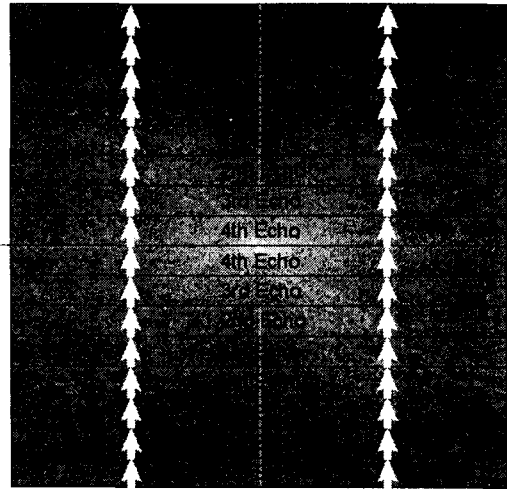


그림 2. k-space에서의 각 에코의 배치도

FSE를 실험하기 위해서는 일반적인 영상기법에서 사용하는 기본적인 매크로 파일들과 더불어 phase gradient의 위치를 기록한 파일, 위상 보정을 위한 파일들이 필요하다.

실험에서 echo train은 8로 하였으므로, k-space를 Ky축으로 전체 16개의 구역으로 나누고 상하 8개 구간을 symmetric하게 배치하였다. 본 논문에서 우선적으로 고려한 에코 배치 방법을 표 1에 나타내었다.

표 1에서 세로축은 effective echo를 나타낸 것이고, 가로축은 한 TR에서 받은 에코 순서를 나타낸다. 표안의 숫자 1-8은 k-space에서의 위치를 DC(1)에서 가장 높은 주파수 영역(8)까지를 각각 나타내고 있다.

4번째 에코를 effective echo로 하여 k-space에서 배치한 예를 그림 2에 나타내었다.

표 1. 에코의 배치도

에코 \ Eff. echo	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th
1	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
2	②	①	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
3	③	②	①	④	⑤	⑥	⑦	⑧
4	④	③	②	①	⑤	⑥	⑦	⑧
5	⑤	④	③	②	①	⑥	⑦	⑧
6	⑥	⑤	④	③	②	①	⑦	⑧
7	⑦	⑥	⑤	④	③	②	①	⑧
8	⑧	⑦	⑥	⑤	④	③	②	①

에코 배치 방법

본 논문에서는 3가지의 에코 배치 방법을 제안하였고, 각 방법들에 대한 시뮬레이션과 실험을 하였다.

그림 3은 k-space를 1에서 256까지로 정의하였을 때, 각각의 line에 들어가는 에코의 세기를 보여주는 것으로 128이 DC 부분을 가리킨다.

그림 3의 에코의 크기는 식 (1)에 의하여 모델링되었다.

$$\text{Echo intensity} = 1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) + A \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 에코의 세기는 T_2 decay를 하는 spin echo 신호와 T_1 decay를 하는 stimulated echo 신호의 합으로 나타낸 것이며, 완벽하지 못한 180° rf 펄스에 의하여 만들어지는 stimulated echo의 세기와 spin echo 세기의 비를 A로 나타내었다. 그림 3에서 T_2 는 80ms, T_1 은 800ms, A는 0.2, $t = n \times 24\text{ms}$, $n = 1 \sim 8$ 로 하였고, 4번째의 echo를 effective echo로 하였다.

방법 1은 DC 구간부터 나열하면, 4, 3, 2, 1, 5, 6, 7, 8로 구성하였고, 방법 2는 4, 3, 2, 1, 6, 5, 8, 7로 구성하였다. 마지막으로 방법 3은 4, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8로 하였다. 여기서 숫자는 echo의 순서를 의미한다.

방법 1 및 방법 2는 인접한 echo들 간의 크기의 차이를 최소로 하는 배치이고 방법 3은 비교적 큰 echo들로 낮은 주파수 성분들을 측정함으로써 SNR 측면에서 유리한 배치이다.

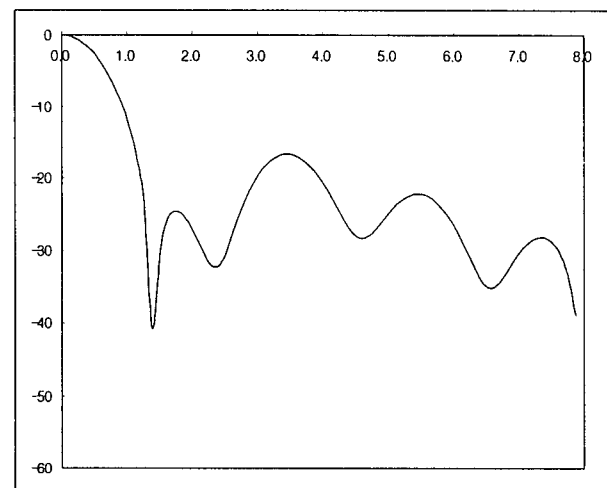
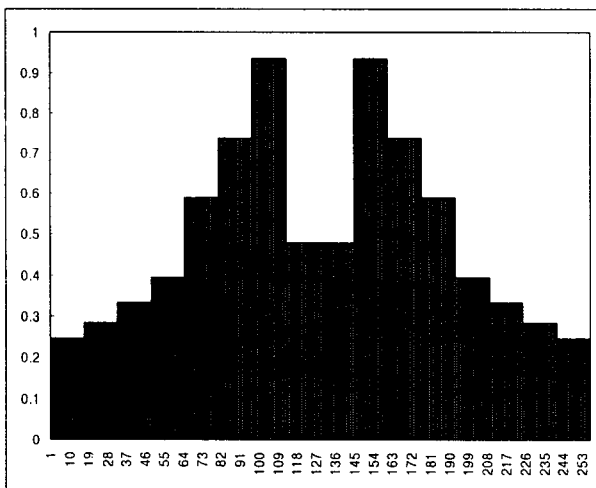
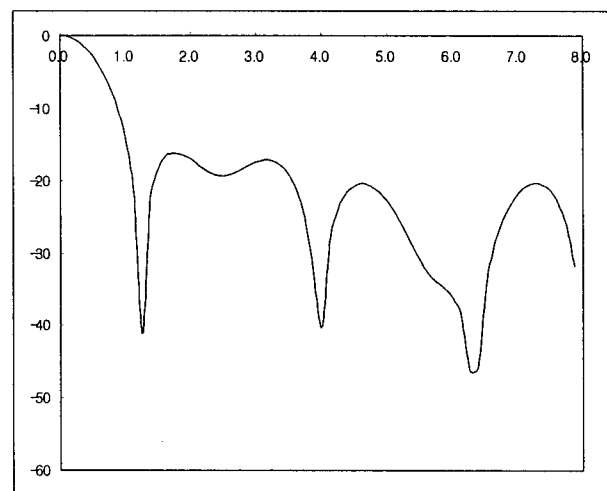
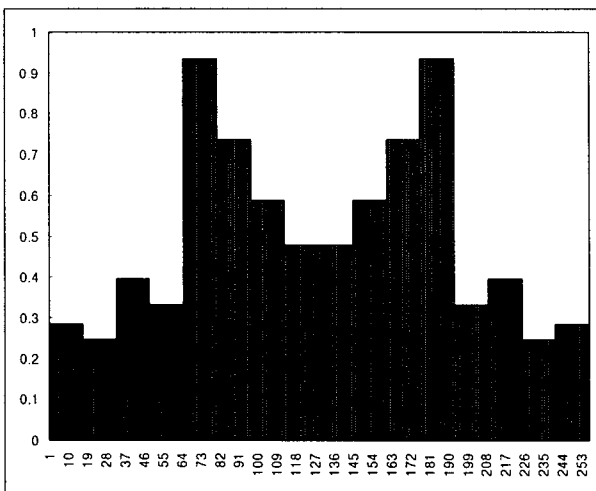
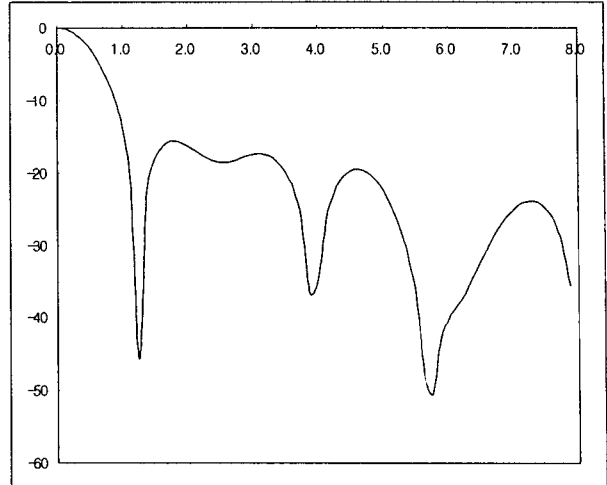
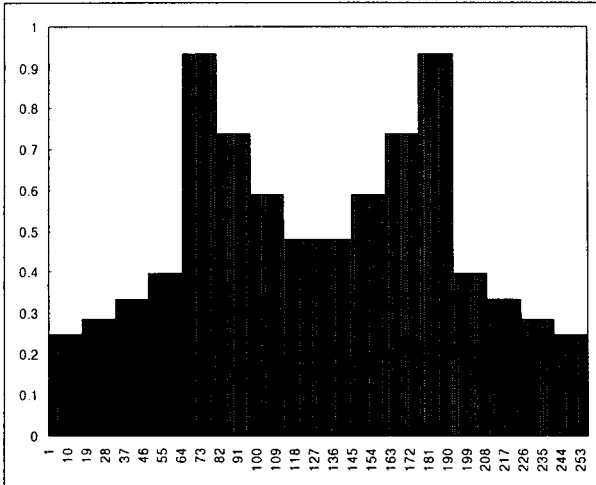


그림 3. k-space에서의 에코의 세기와 배치도

그림 4. 세가지 방법에 의하여 얻은 PSF

Point Spread Functions (PSF)

제안한 3가지 방법들에 대해 zero appended FFT를 통하여 구한 PSF를 그림 4에 나타내었다. 또한 각각의 방법에 대하여 ripple의 크기와 해상도에 영향을 주는 메인 로브의 폭을 표 2에 나타내었다.

그림 4와 표 2에서 보듯이, 방법 3은 가장 큰 sidelobe가 mainlobe와 많이 떨어져 있어 큰 Gibb's artifact가 예상된다. 해상도를 나타내는 메인 로브의 폭은 방법 2가 약 1.675로 가장 좋음을 알 수 있고, 방법 3의 경우, 폭이 1.7482로 영상의 해상도에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

표 2. 제안한 방법들에 의한 PSF의 sidelobe 크기와 mainlobe width

방법	Peak sideband amplitude [dB]	Main lobe width (FWHM)
1	-15.67	1.696
2	-16.25	1.675
3	-16.65	1.748

Echo Amplitude에 기초한 Filtering

그림 3에서 얻은 echo amplitude에 기초하여 filter를 구성하였다.

필터는 본 실험에 들어가기 전에 에코의 크기를 측정하여 다음과 같은 방법으로 구성하였다.

$$C_i = \begin{cases} 1, & \text{if } (A_i < A_{DC}) \\ \frac{A_{DC}}{A_i}, & \text{if } (A_i > A_{DC}) \end{cases} \quad (2)$$

C_i : i-th block filter coefficient

A_i : i-th block echo intensity

A_{DC} : DC block echo intensity

식 (2)에서 처럼, DC 블록의 에코 크기와 비교하여 DC 블록보다 크면, 나누어 줄이고, 작으면 1을 필터 계수로 하여 noise가 증폭되는 것을 막았다.

그림 3에서 보인 3가지 에코 배치 방법에 대하여 식 (2)를 사용하여, 구성된 필터를 그림 5에 나타내었다. 또한, 식 (2)의 필터를 적용한 후 얻은 PSF의 sidelobe 크기와 mainlobe의 width를 표 3에 나타내었다.

표 2와 3을 비교해보면, peak sideband amplitude는 크게 줄어들었고, 메인 로브의 폭도 좁아져 해상도가 향상되었음을 알 수 있다.

표 3. 제안한 방법에 필터를 적용했을시 PSF 비교

방법	Peak sideband amplitude [dB]	Main lobe width (FWHM)
1	-18.11	1.614
2	-18.61	1.601
3	-18.11	1.614

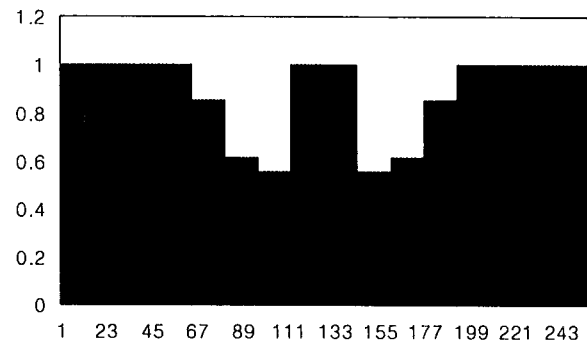
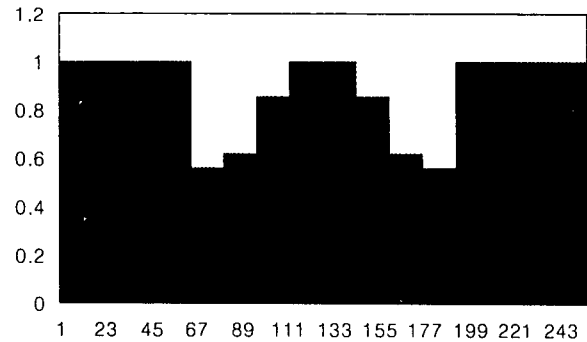
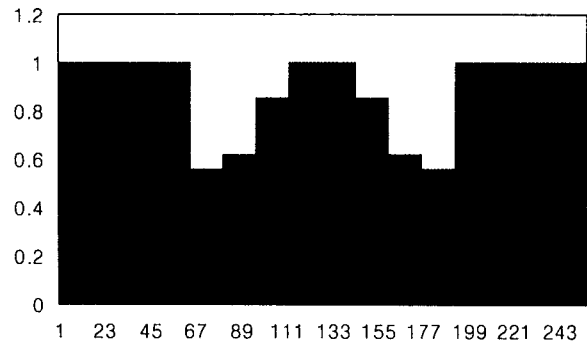


그림 5. 에코 배치 방법에 따라 적용된 Filter

실험

제안한 방법을 국산 MRI 시스템(Magnum 1.0 Tesla)에 구현하여 각각의 방법에 대해 영상을 얻어 보았다. 실험에서는 TR을 2000ms, effective TE를 96ms로 하여 8 slice의 펜텀영상을 얻었다.

그림 6에서 8까지는 3가지 방법으로 얻은 펜텀 영상들과 여기에 필터를 적용한 재구성 영상을 보인 것이다. 이들 그림에서 보면, 방법 1과 방법 2에 의한 영상이 방법 3의 영상에 비하여 Gibb's 현상이 작음을 알 수 있고, 모든 방법들에 대하여 filtering에 의하여 재구성 영상의 화질이 크게 개선됨을 알 수 있다. 특히, 그림 8에서 영상의 경계 부분에 심각한 Gibb's artifact가 있음을 알 수 있으며 필터를

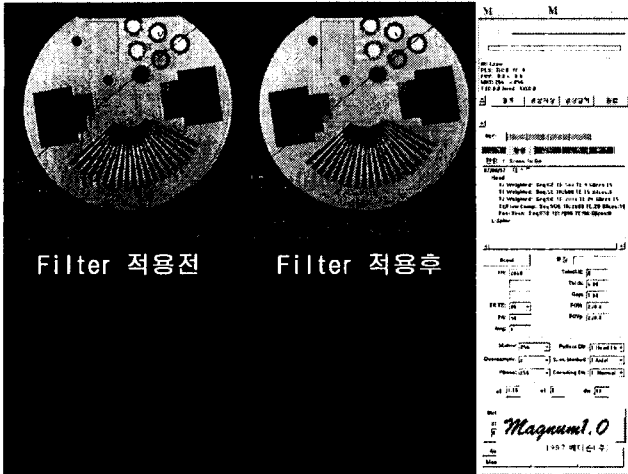


그림 6. 방법 1에 의한 재구성 영상

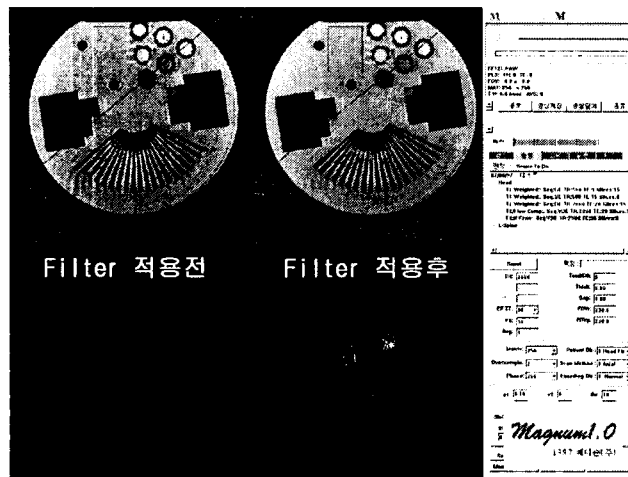


그림 7. 방법 2에 의한 재구성 영상

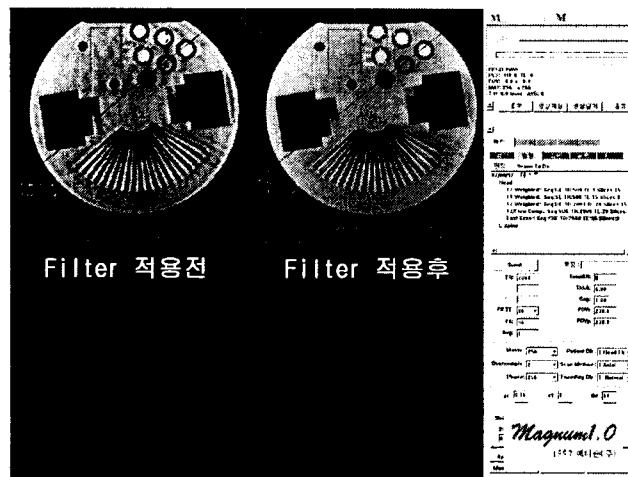


그림 8. 방법 3에 의한 재구성 영상

적용함으로써 많은 개선을 확인할 수 있었다.

표 4는 필터를 적용하기 전과 후의 평탄영역에서의 표준편차를 비교한 것으로 Gibb's 현상을 정량적으로 측정한 것이다.

표 4에서 볼 수 있듯이 에코 크기의 변화가 최소가 되는 배치가 Gibb's 현상을 줄이는데 중요한 역할을

표 4. 평탄영역에서의 표준편차

방법	평탄 영역에서의 표준편차	
	필터 적용 전	필터 적용 후
1	102.85	93.76
2	131.47	127.34
3	153.49	119.54

하는 것을 알 수 있고 에코 크기에 기초를 둔 filtering이 전체적으로 Gibb's 현상을 줄이는데 크게 기여를 하는 것을 알 수 있다.

결론

Fast Spin Echo 영상을 국산 MRI 장비(Magnum, 1.0 Tesla)에 구현하여, 8개의 에코를 동시에 얻어, k-space에 배치하였고, 4번째 에코를 effective 에코로 하여 영상을 얻었다.

시뮬레이션 및 실험을 통하여 보면, 방법 1과 2와 같이 k-space의 DC 구간에서 각 구간사이의 에코 크기의 차이가 최소가 되는 에코의 배치가 ripple을 최소화시켜 Gibb's artifact등이 작게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 echo amplitude를 이용하여 구성된 필터를 적용함으로써, 더욱 향상된 영상을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) K. Oshio, Ferenc A. Jolesz, "Fast MRI by Creating Multiple Spin Echoes in a CPMG Sequence," Magn. Reson. Med., Vol. 30. pp. 251-255. 1993.
- (2) Xiaohong Zhou, Gary P. Cofer, Steve A. Suddarth, G. Allan Johnson, "High-Field MR Microscopy Using Fast Spin-Echoes," Magn. Reson. Med., Vol. 30. pp. 60-67. 1993.
- (3) Hennig, J., Friedburg, H., Magn. Reson. Med., Vol. 6, p. 391. 1988.

Acknowledgement

본 연구는 G7 의료 공학 기술 개발 사업의 지원을 받았음.