

## 최적화된 Flip Angle Pattern 을 사용한 Turbo FLASH MRI : Inversion-Recovery T1-Weighted Imaging 에의 응용

°오창현\*, 최환준\*, 양윤정\*, 이덕래\*, 류연철\*, 현정호\*, 김사라\*, 이 윤\*, 정관진\*\*, 안창범\*\*\*  
\*고려대학교 전자및정보공학부, \*\*메디슨 MRI 연구소, \*\*\*광운대학교

### Turbo FLASH MRI Using Optimized Flip Angle Pattern : Application to Inversion-Recovery T1-Weighted Imaging

°C.H. Oh\*, H.J. Choi\*, Y.J. Yang\*, D.R. Lee\*, Y.C. Ryu\*, J.H. Hyun\*, S.R. Kim\*, Y. Yi\*, K.J. Jung\*\*, C.B. Ahn\*\*\*  
\*Department of Electronics & Information Engineering, Korea University,  
\*\*Medison MRI Institute, and \*\*\*Kwangwoon University

#### ABSTRACT

The 3-D Fast Gradient Echo (Turbo FLASH, Turbo Fast Low Angle Shot) sequence is optimized to achieve a good T1 contrast using variable excitation flip angles. In Turbo FLASH sequence, depending on the contrast preparation scheme, various types of image contrast can be established. While proton density contrast is obtained when using a short repetition time with a short echo time and small flip angles, T1 or T2 weighting can be obtained with proper contrast preparation sequences applied before the above proton density Turbo FLASH sequence. To maximize the contrast to noise ratio while retaining a sharp impulse response (smooth frequency domain response), the excitation flip-angle pattern is optimized through simulation and experiments. The TI (the delay after the preparation sequence which is a 180 degree inversion RF pulse in the IR T1 weighted imaging case), TD (the delay time between the Turbo FLASH sequence and the next preparation), and TR are also optimized for the best image quality. The proposed 3-D Turbo FLASH provides 1 mm x 1 mm x 1.5mm high resolution images within a reasonable 5-8 minutes of imaging time. The proposed imaging sequence has been implemented in a Medison's Magnum 1.0T system and verified through simulations as well as human volunteer imaging. The experimental results show the utility of the proposed method.

#### 서 론

고속 자기공명영상방법 중의 하나인 Turbo FLASH 시퀀스는 Gradient Echo 시퀀스에서 매우 짧은 TR 과 매우 작은 Flip angle (보통 각각 10msec 와 10° 이내)을 사용하여 영상을 얻는 방법을 말한다. 이 기법에서는 TR, TE, flip angle 이 모두 작아 proton density 가 강조된 영상이 얻어진다. T1 또는 T2 contrast 의 강조가 필요할 때는 이를 보완하기 위해 펄스 시퀀스 직전에

본 연구는 보건복지부의 도움으로 수행되었음  
(선도기술 의료공학기술개발과제: HMP-95-G-1-03).

Preparation 시퀀스를 가하는 기법을 사용한다.

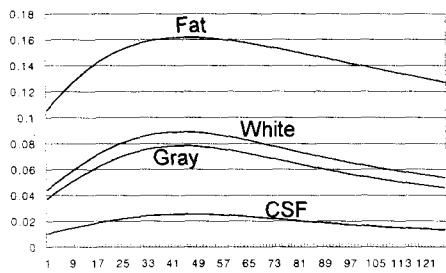
이러한 preparation 방법에는 IR, DEFT, CHES 등 여러 가지 기법이 있는데 여기서는 그 중 IR 을 이용한 T1 contrast 강조를 위한 최적의 조건을 찾아 보았다. 이 논문에서 slice encoding order 는 linear order (-64,-63,...,-1,0,1,2,...,63)와 centric order (0,1,-1,2,-2,...)를 구현, 비교하여 보았고, 각 strategy 에 대해 TI, TD 를 조정하였다. 특히 variable flip angle 과 TI, TD 의 영향을 simulation 을 하고 이를 실제 실험 결과와 비교하여 높은 contrast 의 T1-weighted Turbo FLASH image 를 얻기 위한 영상 parameter 를 최적화 하였다.

#### 방 법

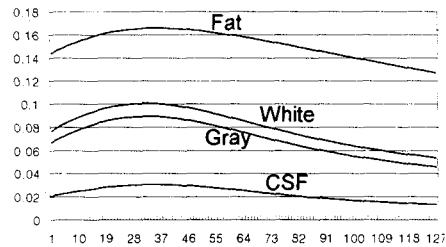
Turbo FLASH 기법에서는 conventional gradient echo (또는 FLASH) 시퀀스를 5msec 이내의 TG (Gradient Echo Time,  $TG \ll T2$ ), 10msec 이내의 TR ( $TR \ll T1$ ), 10° 이내의 flip angle 을 사용하여 relaxation times 의 영향이 거의 없는 spin density 영상을 얻는다. 개발된 펄스 시퀀스는 다음과 같다. Non-selective T1 contrast 를 위해 180° RF pulse 를 한번 가하고, 일정한 Delay (TI) 후에 gradient acquisition sequence 를 가한다. TR 간격으로 slice 방향 encoding 을 바꾸며 128 번의 gradient echo acquisition 이 있다. 그 뒤 recovery 를 위한 delay (TD) 후에 다시 다른 encoding 의 180° RF Pulse 와 FLASH 가 가해 진다(총 192~256 개의 encoding step 수). 전체 두부의 3-D acquisition 을 위해 전부 non-selective RF pulse 를 사용하였다 ( $TR = 10 \text{ ms}$ ;  $TG = 4 \text{ ms}$ ). Excitation flip angle 은 variable flip angle 기법을 사용하여 그 pattern 을 최적화하였다.

#### 결 과

이 논문에서 flip angle 은 ramp 및 Hanning function 등 pattern 에 여러 가지 변화를 주어가며 simulation 과 실험을 하였다. 그 결과, flip angle 이 상승했다가 다시 감소하는 것(10° ~ 30° ~ 10°)보



(a)



(b)

그림 1. 시그널크기 simulation 결과 (a) Linear slice order, TD=50ms, TI=300ms, Flip angle=10° ~ 30° 인 sequence (b) centric slice order, TD=50ms, TI=500ms, Flip angle=10° ~ 30°인 sequence

다는 점점 상승해 가는 것(10° ~ 30°)이 나왔다. 실제 영상에서도 SNR과 contrast를 확인한 결과 simulation 결과와 동일한 결과를 얻었다.

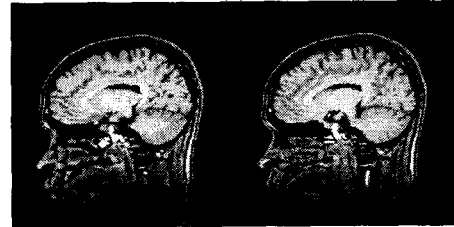
Slice encoding order는 linear order와 centric order를 비교하여 보았고, TI, TD도 조정하여 보았다. 이에 대하여 simulation도 수행하였다. 그 결과를 그림 1에 보였다. 그림 1(a)와 (b)는 각각 linear (TD=50ms, TI=300ms)와 centric (TD=50ms, TI=500ms) slice-encoding order를 사용한 simulation 결과이다. Centric order에서는 TI를 linear slice encoding order보다 약간 길게 할 경우 SNR이 최대였으며 최대 SNR과 contrast는 비슷하였다. Volunteer 영상촬영 결과를 그림 2(a)와 (b)에 보였다. 그림 2(a)의 영상은 TR/TG=10/4ms, TI/TD=300/50ms, linear slice encoding order, FOV=256×256mm, FOVs=230mm, sampling time=8μs, Acq.=512×256×128, image matrix=256×256×128로 얻었으며 (b)는 TI/TD=500/50ms, centric slice order로 얻은 영상이다.

결 론

최적화된 variable flip angle pattern을 사용한 Turbo FLASH 영상법을 제안하여 inversion recovery T1-weighted 영상시퀀스에 적용하여 보았다. 최대의 T1 contrast를 위해 flip angle pattern Optimization을 하였으며 TI, TD도 조정하였다. Simulation 결과를 이용하여 parameter를 최적화한 후 실제 volunteer 영상촬영 결과와 비교하



(a)



(b)

그림 2. (a) Linear slice order, TD=50ms, TI=300ms, Flip angle(10° ~ 30°)인 sequence를 사용하여 얻은 영상 (b) centric slice order, TD=50ms, TI=500ms, Flip angle(10° ~ 30°)인 sequence를 사용하여 얻은 영상

여 optimum한 T1-weighted 3-D Turbo FLASH 영상을 얻었다. Simulation 및 실험으로 slice encoding order도 최적화 시켰다. 제안된 T1 weighted Turbo FLASH sequence로 preparation sequence (180° RF pulse)없는 단순한 FLASH 방법 (30° flip Angle)보다 약 40% 향상된 CNR(Contrast to Noise Ratio)을 얻을 수 있었다. 현재 reduced matrix acquisition 방법과 arbitrary flip angle pattern을 포함한 좀 더 일반적인 flip angle pattern 최적화에 대해 연구 중이다.

참 고 문 헌

1. J.P. Muggler, J.R. Brookeman, R., "Three-Dimensional Magnetization-Prepared Rapid Gradient-Echo Imaging (3D MP RAGE)", Magn. Reson. Med., vol. 15, pp. 152-157, 1990
2. E. Holsinger, J. Riederer, "The Importance of Phase-Encoding Order in Ultra-Short TR Snapshot MR Imaging", Magn. Reson. Med., vol. 16, pp. 481-488, 1990
3. A. Haase, J. Frahm, D. Matthaei, W. Hanicke, K.-D. Merboldt, "FLASH Imaging. Rapid NMR Imaging Using Low Flip-Angle Pulses", J. Magn. Reson., vol. 67, pp. 258-266, 1986
4. P. Bendel, "T2-Weighted Contrasts in Rapid Low flip-Angle Imaging", Magn. Reson. Med., vol. 5, pp. 366-370, 1987
5. A. Jones, A. Rinck, "Approach To Equilibrium In Snapshot Imaging", Magn. Reson. Imag., vol. 8, pp. 797-803, 1990
6. A. Haase, "Snapshot FLASH MRI. Applications to T1, T2, and Chemical-Shift Imaging", Magn. Reson. Imag., vol. 13, pp. 77-89, 1990