

뇌 기능영상에서의 TE값의 변화에 따른 1.5T와 3.0T MRI의 자화율 변화 비교

김 태¹ · 최보영¹ · 김의녕² · 서태석¹ · 이흥규¹ · 신경섭^{1,2}

목적 : 1.5T와 3.0T에서의 FLASH (fast low-angle shot) 기법을 이용한 운동중추영역의 뇌 기능 자기공명영상에서 TE 값 변화에 대한 T_2^* weighting 효과를 관찰하고 TE 값의 변화에 따른 BOLD (blood oxygen level dependent) 효과를 서로 비교하고자 한다. 그리고 활성화 영역에서 활성화상태와 휴식상태의 정량적인 값인 T_2^* 에 의한 차이값을 영상화 하고자 한다.

대상 및 방법 : 24세에서 35세까지의 오른손잡이 10명의 건강한 남녀 (남: 8명, 여: 2명)를 대상으로 가능한 2Hz의 속도로 오른손에서 finger-tapping task (엄지 손가락과 나머지 네 손가락을 차례로 서로 마주치게 하는 운동)를 시행하였다. 운동자극은 처음에 한번의 휴식상태 (3영상)를 가진 후 2번의 활성화상태 (6영상)와 휴식상태 (6영상)를 반복하였다. FLASH (TR/flip angle: 100ms/20°, FOV: 230mm) 방법을 이용하여 1.5T에서는 26, 36, 46, 56, 66 ms의 TE를 사용하였고 3.0T에서는 16, 26, 36, 46, 56 ms의 TE를 사용하였다. 영상을 얻은 후 PC에서 상관계수방법을 이용하여 자체 개발한 프로그램과 상관계수 0.45를 사용하여 분석하였다.

기능적 영상에서 활성화된 영역에서 1.5T와 3.0T에서 각각의 TE에서 활성화 상태와 휴식상태의 차이값을 사용하여 fitting을 하여 적절한 TE값을 찾고 기능적 T_2^* 영상을 구하였다.

결과 : FLASH기법을 사용하여 뇌 기능영상을 얻기에 최적의 TE 값은 1.5T에서는 61.89 ± 2.68 ms, 3.0T에서는 47.64 ± 13.34 였다. 뇌 활성화 영역에서 자화율 변화에 따른 최대 신호강도변화는 1.5T에서는 TE, 66ms에서 3.36%, 3.0T에서는 TE, 46ms에서 10.05%로 3.0T가 1.5T에 비해 약 3배 정도 변화가 큰 것을 알 수 있었다.

산출된 최적의 TE 값은 각각의 TE 값에서 얻은 활성화 상태와 휴식상태의 차이값의 최대의 TE 값과 일치하였다.

결론 : 뇌 기능영상에서 3.0T MRI는 1.5T에 비해 deoxyhemoglobin에 의한 자화율의 변화를 약 3배정도 잘 반영하므로 뇌 기능영상 측정 시 보다 유용성이 있는 것으로 사료된다.

서 론

자기공명영상에서 TR과 TE는 영상의 대조도를 결정하는 중요한 측정변수 (parameter)로서 이를 조절하여 조직간의 대조도를 최대화 시킨다. 그러나 기능적 자기공명영상 (functional MRI)에서는 이들 parameter를 이용해서 일반적인 조직간의

대조도를 최대화시키는 것보다 deoxyhemoglobin농도에 따른 자화율의 변화에 대조도를 최대화시켜야 한다. 기능적 자기공명영상에서 TR은 시간 해상력 (time resolution) 을 향상시키기 위해 가능한 최소한의 시간을 사용하기 때문에 적당한 TE와 flip angle을 결정하는 것이 중요하다. 기능적 자기공명영상에서 검출하고자 하는 자화율효과는 TE가 증가함에 따라 같이 증가하나 측정되는 신호의 크기는 T_2 완화 효과(T_2 relaxation

대한자기공명의과학회지 3:154-158(1999)

¹가톨릭대학교 의과대학 의공학교실

²가톨릭대학교 의과대학 방사선과학교실

이 논문은 산업자원부 공업기반기술 개발사업 연구비 (초고속 핵자기공명 진단기기 개발(3.0T) (연구번호:B31-973-3302-01-1-4))의 일부지원에 의하여 이루어진 것임.

접 수 : 1999년 5월 3일, 채 택 : 99년 6월 8일

통신저자 : 김 태 (137-701) 서울시 서초구 반포동 505 가톨릭 의과대학연구원 자기공명영상연구실

Tel. 82-2-590-2436 Fax. 82-2-532-1779

effect) 때문에 TE가 증가함에 따라 감소한다. 그러므로 기능적 자기공명영상에서 적당한 TE의 선택이 자화율의 변화를 측정하는데 직접적인 영향을 미친다고 할 수 있다. 현재 임상에서 널리 쓰이고 있는 1.5T에서 각 TE에 관한 연구는 많이 보고된 바가 있다(1-3). 한편 자화율 효과는 자장의 세기가 세어질수록 더 크게 나타나기 때문에 최근 들어 고자장에서 기능적자기공명영상 연구가 활발히 진행되고 있다(4,5)

본 연구에서는 FLASH (fast low-angle shot) 펄스시퀀스를 이용하여 1.5T와 3.0T MRI장비에서 기능적 자기공명영상을 실행하여 TE 값 변화에 따른 결과들을 관찰하여 자화율 대조도와 신호대 잡음비를 높일 수 있는 최적 parameter를 찾아내고 고자장에서 기능적자기공명영상의 유용성을 평가하고자 한다. 그리고 각 조직의 절대값인 T_2^* 를 측정하여 이를 정량화하여 비교하고 이를 영상화함으로서 BOLD (blood oxygen level dependent)효과에 의한 기능적 자기공명영상과 비교하고자 한다.

대상 및 방법

운동자극에 의한 기능적 자기공명영상을 얻기 위하여 오른손을 사용하는 24세에서 37세까지의 건강한 지원자 남녀 10명을 대상으로 2Hz의 속도로 엄지 손가락을 차례로 각 손가락에 마주 치도록 하여 한번의 휴식상태 (3영상)와 2cycle의 활성화상태 (6영상)와 휴식상태 (6영상)를 실시하였다. 한 영상을 획득하는데 걸린 시간은 1.5T는 8초, 3.0T는 9.76초 였다.

1.5T Magnetom Vision-plus(Siemens AG, Erlangen, Germany)와 두부코일(head coil)을 사용하고 3.0T Magnetom(Medison, Seoul, Korea)과 자체 제작된 두부코일을 사용하였다. 대상자의 움직임을 줄이기 위하여 머리주위에 foam pad를 사용하고 경사자계(gradient)에 의한 소음에 의한 효과를 줄이기 위해 귀마개를 사용했다. 자장의 균질성을 높이기 위해 shimming과정을 수행한 뒤 1.5T와 3.0T에서 FLASH 펄스시퀀스(TR/FA:100ms/20°, Matrix: 64×128, FOV: 230mm)를 사용하여 TE변화에 따른 변화를 보기 위하여flip angle 20도에서 TE를 1.5T에서는26, 36, 46, 56, 66, 76ms에서 실행하고 3.0T에서는 16, 26, 36, 46, 56, 66ms에서 각각 실행하였다.

MR에서 얻어진 영상들을 PC로 전송한 뒤 IDL(interactive data language) (Research Systems Inc., Colorado, U.S.A.) 영상처리 개발언어를 사용하여 자체 개발한 프로그램을 이용하여 분석하였다.

상관계수방법을 이용하여 구한 기능적 자기공명영상의 운동 중추 영역의 활성화 영역에서 ROI를 그린 후 그 영역 내에서 활성화 된 Pixel의 좌표를 구한 다음 각각의 TE에 대해 구해진 좌표에 해당하는 벡터들을 구한 뒤 이들 벡터를 활성화 상태와 휴식상태로 나누어 각각 평균을 구하였다. 각각의 TE에 대하여 얻어진 두 값들에 대하여 식(1)을 사용하여 로그값으로 취해진 값들에 대한 선형모형을 통하여 활성화상태와 휴식상태에 대한

T_2^* 값을 얻었다.

$$S = S_0 \exp(-TE/T_2^*) \tag{1}$$

기능적 자기공명영상에 가장 적절한 TE값을 계산하기 위해 위에서 얻어진 활성화 상태와 휴식상태에 대한 T_2^* 값들을 이용하여 각각의 TE값에 대하여 활성화 상태에서 휴식상태를 뺀 식을 미분한 식 [2]를 이용하였다.

$$\begin{aligned} f(TE) &= S_0 \exp(-TE/T_{2Activate}^*) - S_0 \exp(-TE/T_{2Rest}^*) \\ f'(TE) &= -S_0 (1/T_{2Activate}^*) \exp(-TE/T_{2Activate}^*) + \\ & S_0 (1/T_{2Rest}^*) \exp(-TE/T_{2Rest}^*) \end{aligned} \tag{2}$$

각각의 TE에 대한 신호강도곡선을 이용하여 자화율의 변화에 의한 활성화 상태와 휴식상태의 차이 값의 평균을 구하여 1.5T와 3.0T에서의 결과를 비교하였다.

그리고, 휴식상태와 활성화 상태의 각 pixel에 대해 식(1)을 사용하여 T_2^* map을 작성한 뒤 활성화 상태의 map에서 휴식상태의 map을 감산하여 자극에 의한 활성화 부위를 얻은 다음 T1 영상에 중첩 시켜 기능적 자기공명 영상 T_2^* 영상을 구하였다.

결 과

각각의 TE에 대해 얻은 결과들을 식 (1)을 이용하여 1.5T에서와 3.0T에서 각각 활성화상태와 휴식상태의 T_2^* 값을 구한 결과를 Table 1에 요약하였다. 식 [2]를 이용하여 적절한 TE값을 계산한 결과 1.5T에서는 61.89msec (표준편차 2.68), 3.0T에서는 47.64msec (표준편차 13.34) 이었다.

활성화상태와 휴식상태의 각각의 TE에 대한 신호강도곡선의

Table 1. Mean T_2^* value of activation and rest state in 1.5T and 3.0T.

	Activation	Rest
3.0 T	47.7704 (±12.7828)	47.5453 (±13.9545)
1.5 T	64.1556 (±5.96611)	60.0719 (±1.87517)

Table 2. The Signal intensity change (%) of 1.5T and 3.0T. Maximum changes of TE is accordance with calculated optimum TE.

TE (ms)	3.0T	1.5T
16	6.85	
26	7.61	1.35
36	9.26	1.41
46	10.05	2.14
56	9.64	2.63
66	8.68	3.36
76		2.61

$$\begin{aligned} \text{Signal Intensity Change (\%)} &= \\ \frac{\text{Mean signal intensity in activation} - \text{Mean signal intensity in rest}}{\text{Mean signal intensity in rest}} \times 100 \end{aligned}$$

김태 의

활성화상태와 휴식상태의 평균을 구하여 자화율효과에 따른 신호강도변화를 비교해 본 결과 1.5 T에서는 TE 66에서 3.36%로 가장 크게 나타났고 3.0T에서는 TE 46에서 10.05%로 가장 크게 나타났다(Table 2). 이 결과들을 비교해 볼 때 가장 크게 신호강도변화를 나타내는 TE값이 위에서 계산한 TE값과 거의 일치함을 알 수 있었고 3.0T가 1.5T에 신호강도변화가 약 3배 정도가 됨을 발견할 수 있었다.

식 [1]에 의한 활성화상태와 휴식상태에 대한 T_2^* map을 구하여 활성화상태의 map에서 휴식상태의 map을 감산하여 기능적 자기공명영상과 같은 활성화부위를 얻을 수 있었다. 이를 T1 영상에 중첩 시켜 T_2^* 값에 의한 기능적 자기공명영상을 1.5T와 3.0T에서 각각 얻은 결과 운동기능 자극에 의한 일반적인 기능적 자기공명영상의 결과와 일치함을 알 수 있었다(Fig. 1).

고 찰

기능적 자기공명영상에서 긴 TE 값은 BOLD영상 contrast

에 대한 T_2^* weighting을 강조하기 위해 사용된다. 그러나 자화율효과를 강조하기 위해 TE를 길게 하면 할수록 T_2 relaxation에 의해 측정되어지는 신호의 크기가 작아지게 된다. 그러므로 적절한 TE값의 선택이 기능적 자기공명영상에서 자화율변화를 잘 반영할 수 있는 가장 중요한 parameter라 할 수 있다. Frahm등은 2.0T에서 FLASH로 실험한 결과 30에서 40사이의 TE를 가장 적절하게 susceptibility weighting과 영상의 SNR를 만족하는 것으로 보고하고 있다(2). 그리고 Meron등에 의하면 적절한 TE의 선택 값은 그 지역 tissue의 T_2^* 값임을 보고하고 있다(4). 이는 본 연구에서 계산식을 통해 구한 활성화부위의 조직의 T_2^* 값과 실험을 통해 얻은 자화율의 변화가 가장 많이 나타나는 TE값과 거의 일치함으로써 이를 입증하고 있다. 일반적으로 T_2^* 값을 구할 때 multi-echo를 사용해야 되는 것이 원칙이나 Meron등에 의하면 multi-echo와 각각의 TE 값에 의한 결과에는 차이가 없는 것으로 보고하고 있다(4).

한편 자화율의 변화를 높이는 방법으로 자장의 세기를 높이는 것으로 알려져 있는데 일정한 TE에 대해 주어진 혈액의 자화율

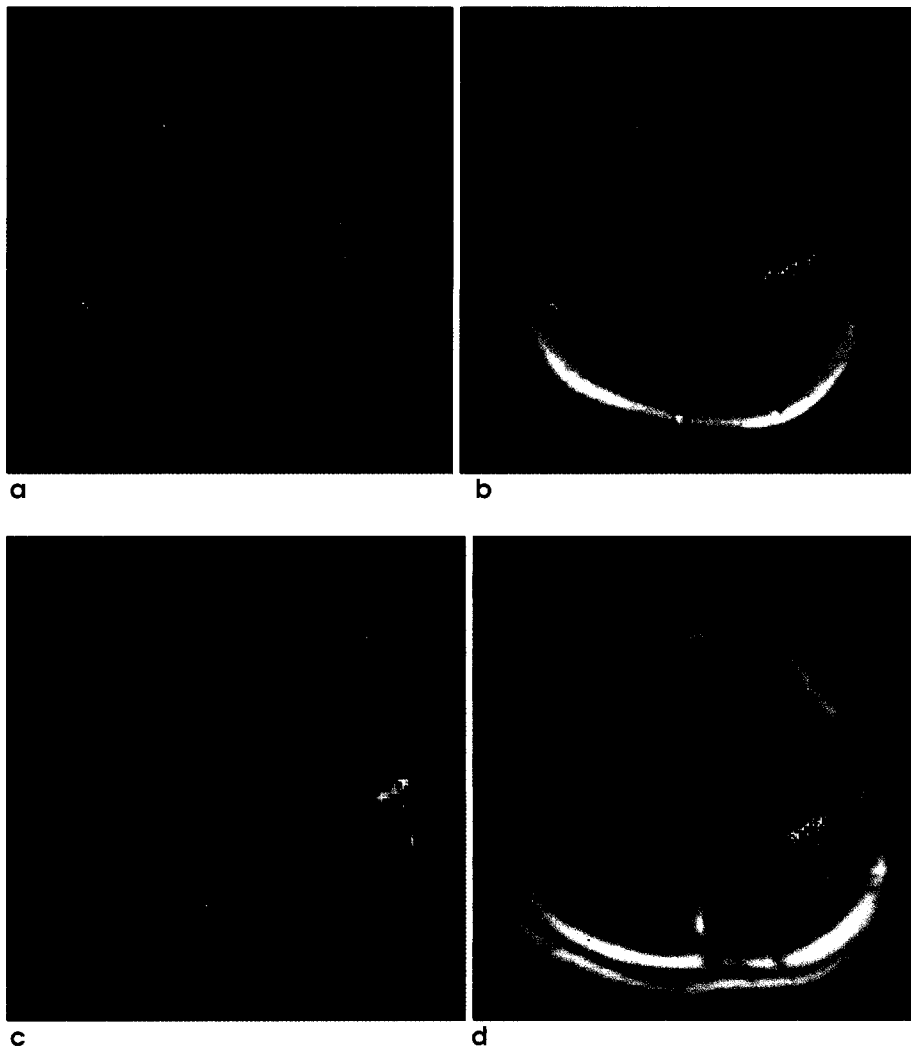


Fig. 1. Subtraction images with T_2^* map of activation and rest and functional T_2^* images. (a) subtraction image in 1.5 T (b) functional T_2^* map in 1.5T (c) subtraction image in 3.0T (d) functional T_2^* map in 3.0T. Activation area of these images are consistent with functional MRI of motor activation.

의 변화에 대한 relaxation rate의 변화는 static field의 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있다. 이에 따르면 본 연구가 1.5T와 3.0T에서 수행된 것이므로 이론적으로 $(3.0/1.5)^2 = 4$ 배가 됨을 알 수 있는데 자장의 균질성 등 여러 가지 요인에 의해 본 연구에서는 약 3배 정도 증가함을 발견할 수 있었다(5). 그리고 고자장이 자화율이 높다는 장점이외에 T_2^* 값이 저자장보다 낮으므로 FLASH기법의 경우 뇌 기능 영상에서 짧은 TE를 사용하여도 충분한 BOLD effect를 반영할 수 있으므로 3.0T가 1.5T에 비해 같은 TR내에서 더 많은 영상절편을 얻을 수 있는 장점이 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. Blamire AM, Ogawa S, Ugurbil K, et al. Dynamic mapping of the human visual cortex by high-speed magnetic resonance imaging. Proc Natl Acad Sci USA 1992 ; 89 : 11069-11073
2. Frahm J, Merboldt KD, Hancicke W. Functional MRI of human brain activation at high spatial resolution. Magn Reson Med 1993; 29 : 139-144
3. Bandettini PA, Wong EC, Hinks, et al. Quantification of changes in relaxation rate $R2^*$ and $R2$ in activated brain tissue. Abstract, 11th SMRM annual meeting, Berlin, 1992, p 1822
4. Meron RS, Ogawa S, David W, et al. 4 Tesla gradient recalled echo characteristics of photic stimulation-induced signal changes in human primary visual cortex. Magn Reson Med 1993 ; 30 : 380-386
5. Turner R, Jezzard P, Wen H, et al. Functional mapping of the human visual cortex at 4 and 1.5 tesla using deoxygenation contrast EPI. Magn Reson Med 1993; 29 : 277-279
6. Lie G, Sobering G, Olson AW, et al. A functional MRI technique combining principles of echo-shifting with a train of observations (PRESTO). Magn Reson Med 1993 ; 30 : 764-768
7. Lai S, Hopkins AL, Haacke EM, et al. Identification of vascular structure as a major source of signal contrast in high resolution 2D and 3D functional activation imaging of motor cortex at 1.5T. Magn Reson Med 1993 ; 30 : 387-392

The Comparison of Susceptibility Changes in 1.5T and 3.0T MRIs due to TE Change in Functional MRI

Tae Kim¹, Bo-Young Choe¹, Euy-Neyng Kim², Tae-Suk Suh¹,
Heung-Kyu Lee¹, Kyung-Sub Shinn^{1,2}

¹Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Catholic University

²Department of Radiology, College of Medicine, Catholic University

Purpose : The purpose of this study was to find the optimum TE value for enhancing T_2^* weighting effect and minimizing the SNR degradation and to compare the BOLD effects according to the changes of TE in 1.5T and 3.0T MRI systems.

Materials and Methods : Healthy normal volunteers (eight males and two females with 24-38 years old) participated in this study. Each volunteer was asked to perform a simple finger-tapping task (sequential opposition of thumb to each of the other four fingers) with right hand with a mean frequency of about 2Hz. The stimulus was initially off for 3 images and was then alternatively switched on and off for 2 cycles of 6 images. Images were acquired on the 1.5T and 3.0T MRI with the FLASH (fast low-angle shot) pulse sequence (TR : 100ms, FA : 20°, FOV : 230mm) that was used with 26, 36, 46, 56, 66, 76ms of TE times in 1.5T and 16, 26, 36, 46, 56, 66ms of TE in 3.0T MRI system. After the completion of scan, MR images were transferred into a PC and processed with a home-made analysis program based on the correlation coefficient method with the threshold value of 0.45. To search for the optimum TE value in fMRI, the difference between the activation and the rest by the susceptibility change for each TE was used in 1.5T and 3.0T respectively. In addition, the functional T_2^* map was calculated to quantify susceptibility change.

Results : The calculated optimum TE for fMRI was 61.89 ± 2.68 at 1.5T and 47.64 ± 13.34 at 3.0T. The maximum percentage of signal intensity change due to the susceptibility effect in activation region was 3.36% at TE 66ms in 1.5T and 10.05% at TE 46ms in 3.0T, respectively. The signal intensity change of 3.0T was about 3 times bigger than that of 1.5T.

The calculated optimum TE value was consistent with TE values which were obtained from the maximum signal change for each TE.

Conclusion : In this study, the 3.0T MRI was clearly more sensitive, about three times bigger than the 1.5T in detecting the susceptibility due to the deoxyhemoglobin level change in the functional MR imaging. So the 3.0T fMRI is more useful than 1.5T.

Index words : Methodology (functional neuro-acquisition and analysis)

Address reprint requests to : Tae Kim, M.D., Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Catholic University
#505, Banpo-Dong, Seocho-Ku, Seoul 137-701, Korea.
Tel. 82-2-590-2436 Fax. 82-2-532-1779