

3 Tesla MRI 시스템에서 초고속 나선주사영상을 위한 고차 shimming

김판기¹ · 임종우² · 안창범¹

목적 : 3.0 Tesla와 같은 고 자장에서 고해상도의 나선주사영상을 얻기 위해서는 주자장을 균일하게 만들어야 한다. 특히, 나선주사영상인 경우 스핀-에코펄스 시퀀스(SE)나 경사자계 에코 펄스 시퀀스(GE)에 비하여 측정 시간이 길기 때문에 주자장이 균일하지 못하다면, off-resonance 현상으로 영상의 blur가 심해진다. 본 연구에서는 빠른 시간 안에 주자장을 균일하게 할 수 있는 고차(Higher-order) shimming 방법을 모색했다.

대상 및 방법 : 3 Tesla 자기 공명 영상 시스템에서 고해상도의 나선주사영상을 얻기에 적합한 정도의 균일한 주자장을 빠른 시간 안에 만들기 위해, 한번의 스캔으로 axial, sagittal, coronal 방향의 불균일도 map을 구할 수 있는 펄스 시퀀스를 제안하였고, 불균일도 map으로부터 spherical harmonics 분석을 통해 shim 코일에 적절한 전류를 인가하여 주자장을 균일하게 만들었다.

결과 : 3 Tesla 자기 공명 영상 시스템에서 주자장의 불균일도는 주자장의 크기에 비례하게 된다. 제안한 펄스 시퀀스로 얻은 영상을 이용하여 불균일도 map을 만들 수 있었고, 이를 spherical harmonics 분석을 하여 2-3회의 고차 shimming으로 불균일한 자장을 균일하게 만들 수 있었다. 제안된 고차 shimming 방법은 전체 영상 영역 뿐만 아니라 선택한 영역에 대해서만 적용도 가능하기 때문에 국부 영역에 대한 고차 shimming이 가능하다. 고차 shimming이 적용되어 주자장이 균일하게 개선된 상태에서 고해상도의 나선주사영상을 얻을 수 있었다.

결론 : 3 Tesla 고자장 자기 공명 영상 시스템에서 주자장의 불균일도를 개선하기 위한 펄스 시퀀스와 알고리즘을 통해 주자장의 불균일도를 빠른 시간 안에 개선할 수 있었다. 주자장의 불균일도를 효과적으로 개선함으로써, 고해상도의 나선주사 영상을 얻을 수 있었다.

서 론

3 Tesla 고 자장에서의 자기 공명 영상은 신호대잡음비가 높은 영상을 얻을 수 있지만, 주자장의 크기에 비례하여 주자장의 불균일도도 역시 커지게 된다. 이러한 주자장의 불균일도를 줄이기 위해 shimming은 필수적이다. 여기에서 shimming은 자

자장을 균일하게 만드는 과정이다. Shimming은 스핀에코 펄스 시퀀스나 경사자계 에코펄스 시퀀스와 같은 일반적인 영상 기법 보다는 EPI나 나선주사 펄스 시퀀스와 같은 초고속 영상 기법에서 특히 중요하게 된다. 초고속 영상 기법인 EPI나 나선주사영상기법일 경우 한번의 excitation으로 전체 또는 상당히 많은 부분의 k-space 데이터를 얻기 때문에 일반적인 영상 기법에 비해 데이터를 측정하는 시간이 상대적으로 길게 된다. 주

대한자기공명의과학회지 11:95-102(2007)

¹광운대학교 VIA-멀티미디어센터

²슈아이슬테크놀로지

접 수 : 2007년 9월 5일, 채 택 : 2007년 10월 29일

통신저자 : 안창범, (139-701) 서울시 노원구 월계동 447-1 광운대학교 전기공학과

Tel. (02)940-5148 Fax. (02)909-3159 E-mail: cbahn@kw.ac.kr

김판기 외

자장의 불균일도에 따른 위상의 변화는 시간에 비례하여 증가하기 때문에 초고속 영상 기법인 경우 주자장의 불균일도에 매우 민감하게 영향을 받는다. 이러한 이유로, 주자장의 불균일도는 초고속 영상에서 영상의 왜곡과 신호의 감쇄, 영상의 blur 등의 문제를 발생시킨다. 따라서, 주자장의 불균일도를 개선하는 일은 나선주사영상 기법을 비롯한 초고속 영상 기법에서 영상의 화질을 향상시키기 위한 필수적인 과정이다.

일반적으로 magnet bore 주위에 철편을 넣어 주자장을 균일하게 만드는 passive shimming을 적용한다. 그러나, passive shimming이 잘 이루어졌어도 magnet bore 안에 영상 대상물체가 들어가게 되면 그 물체의 자화율에 의해 주자장의 균일성이 떨어지게 되는데 이를 보정하기 위해 magnet bore 내에 설치되어 있는 shim 코일에 전류를 흘려 불균일한 자장을 상쇄한다(active shimming).

본 연구에서는 고자장의 자기공명 영상 시스템에서의 주자장의 불균일도를 짧은 시간 내에 보정하기 위해, 고속 스핀 에코(Fast Spin Echo: FSE) 기반의 수정된 영상 기법을 사용하여, 불균일도 map을 얻었다. 그리고, 의사역행열변환(pseudo-inverse transform)을 이용하여 주자장의 불균일도의 패턴을 분석하고, 이를 보정함으로써 주자장을 균일하게 만들었다.

본 연구에 사용된 MRI 시스템은 ISOL technology의 CHORUS 3T 장비이며, shim 코일은 X, Y, Z의 선형 shim 코일과 Z2, ZX, ZY, X2-Y2, XY의 고차 shim 코일로 구성되어 있다.

대상 및 방법

Field inhomogeneity map

주자장이 불균일한 자기 공명 영상 시스템에서 측정된 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \int_x \int_y m(x, y) e^{i2\pi[k_x(t)x + k_y(t)y + \gamma \Delta B_0(x, y)t]} dx dy \quad [1]$$

여기에서 $m(x, y)$ 는 촬영 대상 물체의 이차원 스핀 분포이고, k_x 와 k_y 는 측정된 데이터의 k-space 좌표이며, $\Delta B_0(x, y)$ 는 magnet 안의 물질의 자화율이나 주변의 환경에 따른 주자장의 불균일도를 나타낸다 (1). 그리고 t 는 측정 시간으로서 주자장의 불균일도로 인한 위상은 $\Delta B_0(x, y)$ 와 시간의 곱에 비례함을 알 수 있다. 따라서 짧은 시간 내에 모든 데이터를 얻을 수 있다면 높은 해상도의 좋은 영상을 얻을 수 있지만, 나선주사영상과 같은 초고속 영상 기법은 측정 시간이 상대적으로 길기 때문에 불균일도에 따른 왜곡이 증가하게 된다.

이러한 주자장의 불균일도를 개선하기 위해서는 우선 주자장의 불균일도 map을 측정하여야 한다. 이를 위해서는 에코의 위치를 불균일도에 의한 위상이 refocusing 되는 에코 time과 에코 time에서 일정 시간(Δt)만큼 신호를 이동시킨 시점에서 두 번 측정하여, 두 위상의 차이를 구한 후 Δt 로 나누어 줌으로써 주자장의 단위시간당 불균일도에 의한 주파수의 변화량을 알 수 있게 된다. 여기에서 두 위상의 차이를 구함으로써 시스템의 다른 요소에 의하여 발생하는 위상으로 인한 오차를 방지 할 수 있다.

에코 time이 다른 두 개의 영상을 짧은 시간 내에 얻기 위해 고속스핀에코 펄스 시퀀스(FSE)를 사용하였고, multi-slice 방식을 수정하여 multiple directional slice를 얻도록 하여 한번의 스캔으로 axial, sagittal, coronal 방향에 대한 영상을 얻어, x, y, z 방향의 주자장 불균일도 map을 얻는데 걸리는 시간을 획기적으로 줄였다.

Fig.1은 field map를 얻기 위해 사용된 펄스 시퀀스를 간략하게 나타낸 것이다. Fig.1에서 I_1 은 에코 time일 때에 얻어진 영상을 나타내고, I_2 는 에코 time에서 Δt 만큼 이동하여 얻어진 영상을 나타낸다.

식[1]의 Fourier 변환으로 얻어지는 재구성 영상 $I_1(x, y)$ 와 $I_2(x, y)$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다. 주자장의 불균일도를 계

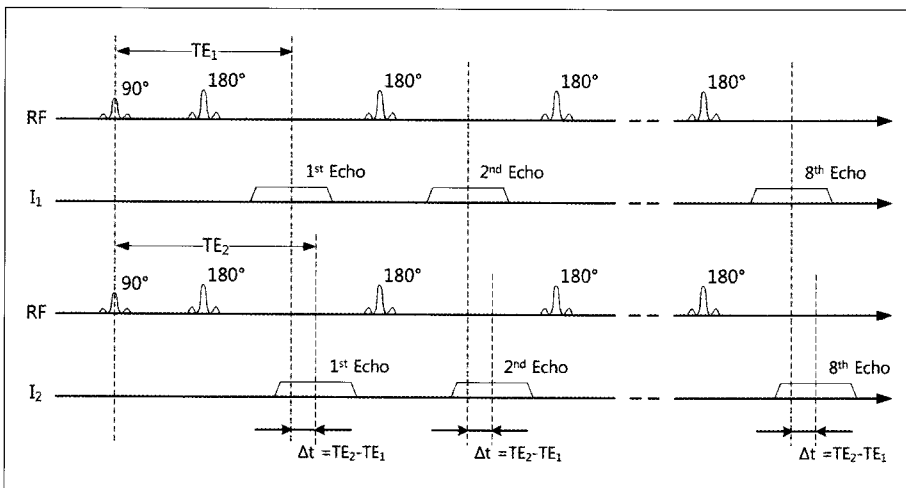


Fig. 1. Pulse sequence for measuring field inhomogeneity maps based on Fast Spin Echo technique.

산하기 위해 에코 time에서 얻은 영상 I_1 과 에코 time에서 Δt 시간 후에 측정하여 Δt 시간 동안 주자장의 불균일에 의해 변화된 위상 정보가 포함된 영상 I_2 의 차이를 통해 불균일한 주자장에 의한 위상의 변화량을 구할 수 있다.

$$I_1(x, y) = m(x, y)e^{i\phi_1(x, y)} \quad [2]$$

$$I_2(x, y) = m(x, y)e^{i\phi_2(x, y)} \quad [3]$$

$$\phi_2(x, y) = \phi_1(x, y) + 2\pi\gamma\Delta B_0(x, y)\Delta t \quad [4]$$

여기에서 γ 는 gyromagnetic ratio, $\phi_1(x, y)$ 는 필터나 delay등의 시스템의 다른 요소에 의하여 발생하는 위상을 나타낸다. 식[4]로부터 주자장의 불균일도 map $\Delta B_0(x, y)$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$\Delta B_0(x, y) = \frac{\phi_2(x, y) - \phi_1(x, y)}{2\pi\gamma\Delta t} \quad [5]$$

식[5]에서 ϕ_1 와 ϕ_2 의 차이가 2π 보다 크게 되면 위상 불연속화 현상(phase wrapping)이 발생한다. Phase wrapping 현상을 줄여주기 위하여 식[6]을 사용하여 $\Delta B_0(x, y)$ 을 구하였다.

$$\Delta B_0(x, y) = \frac{\text{angle}[\text{conj}(I_1(x, y)) \cdot I_2(x, y)]}{2\pi\gamma\Delta t} \quad [6]$$

식[6]은 복소수 형태의 I_1 과 I_2 에 conjugate을 이용하여 두 영상간의 위상 차이를 구하는 것으로서, 이러한 계산 방식은 식 [5]에 비해 ϕ_1 과 ϕ_2 를 구할 때 발생할 수 있는 phase wrapping 가능성을 줄이고, 노이즈에 의한 phase의 영향을 최소화 할 수 있는 계산 방법이다.

Phase wrapping을 제한하기 위해서는 1) Δt 를 조정하여 phase의 크기를 줄이거나, 2) phase의 offset을 제거, 그리고 3) phase unwrapping algorithm을 통하여 phase를 보정하는 방법이 있다. 본 연구에서는 이들 방법을 결합하여 사용하였고 phase unwrapping 알고리즘으로는 "quality guided path following (3)" 방법을 사용하였다.

Δt 의 시간은 phase wrapping이 발생하지 않을 정도의 작은 값을 사용하는 것이 좋다. 그러나 fat과 water가 함께 있는 in-vivo 실험의 경우, 불균일도 map에 fat과 water의 위상차가 추가적으로 나타나게 됨으로써, shimming에 적절하지 못한 불균일도 map이 얻어진다. 이러한 경우 fat과 water의 주파수 차이가 3.4ppm 정도인 것을 감안하여 둘의 위상이 같아지는 Δt 를 결정하는 것이 중요한데, 주자장의 세기가 3 Tesla인 경

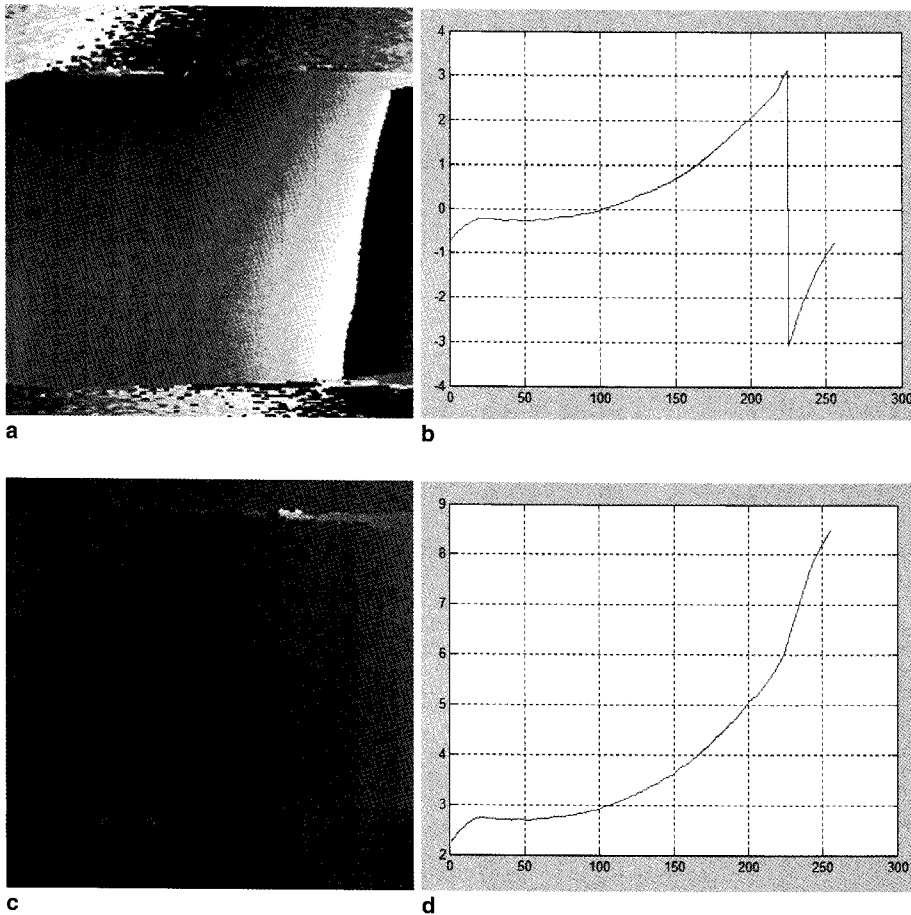


Fig. 2. Phase unwrapping using the phase unwrapping algorithm. Wrapped field map (a), horizontal profile of the wrapped field map (b), unwrapped field map by the phase unwrapping algorithm (c), and horizontal profile of the unwrapped field map (d).

김판기 외

우는 fat과 water와의 주파수 차이가 420Hz 정도의 차이가 있기 때문에 fat과 water의 위상이 동위상이 되는 2.38 ms 정도가 적합한 Δt 가 된다.

Fig. 2는 phase unwrapping algorithm을 이용하여 위상을 보정한 결과이다. Fig. 2(a)는 wrap된 위상을 나타내고, (b)는 (a)의 수평방향 프로파일이다. (c)는 unwrapping 알고리즘으로 보정된 위상이고, (d)는 (c)의 프로파일이다.

Pseudo-inverse transform을 이용한 Field analysis

균일하지 못한 주자장을 균일하게 만들기 위해, 불균일도 map을 shim 코일에서 제공하는 자장패턴(spherical harmonics)으로 분석하게 되면 각 자장패턴의 성분을 구할 수 있고, 이것을 shim power supply의 전류로 인가하면 shimming을 이룰 수 있다 (2). 이를 위해 각 방향에 관한 불균일도 map을 식(6)과 같은 자장 패턴으로 표현한다 (4). 식(6)에서 a, b, c, d, e, f는 자장패턴의 계수가 되고, 이는 shim power supply에서 shim 코일로 보내어지는 전류의 양을 결정하는 계수가 된다. 이 계수를 adjustment vector(Δa)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{Axial: } \Delta B_0(x,y) &= a' \cdot (x^2-y^2) + b' \cdot x + c' \cdot y + d' \cdot xy + e' \\ \text{Sagittal: } \Delta B_0(y,z) &= a'' \cdot (-y^2) + b'' \cdot z^2 + c'' \cdot y + d'' \cdot z + e'' \cdot yz + f'' \\ \text{Coronal: } \Delta B_0(z,x) &= a''' \cdot (z^2) + b''' \cdot x^2 + c''' \cdot z + d''' \cdot x + e''' \cdot zx + f''' \end{aligned} \quad [6]$$

각 방향에 대하여 식(6)을 식(7)과 같이 행렬식으로 표시할 수 있다. 여기서 ΔB_0 는 x, y, z좌표의 위치에서 측정된 불균일도 map의 값이며, F는 식(6)의 자장 패턴이다.

$$\Delta B_0 = F \cdot \Delta a \quad [7]$$

식(7)로부터 Δa 는 아래와 같이 얻어진다.

$$\Delta a = F^{-1} \cdot \Delta B_0 \quad [8]$$

여기에서 F는 의사 역행렬을 나타내며, 아래와 같이 주어진다.

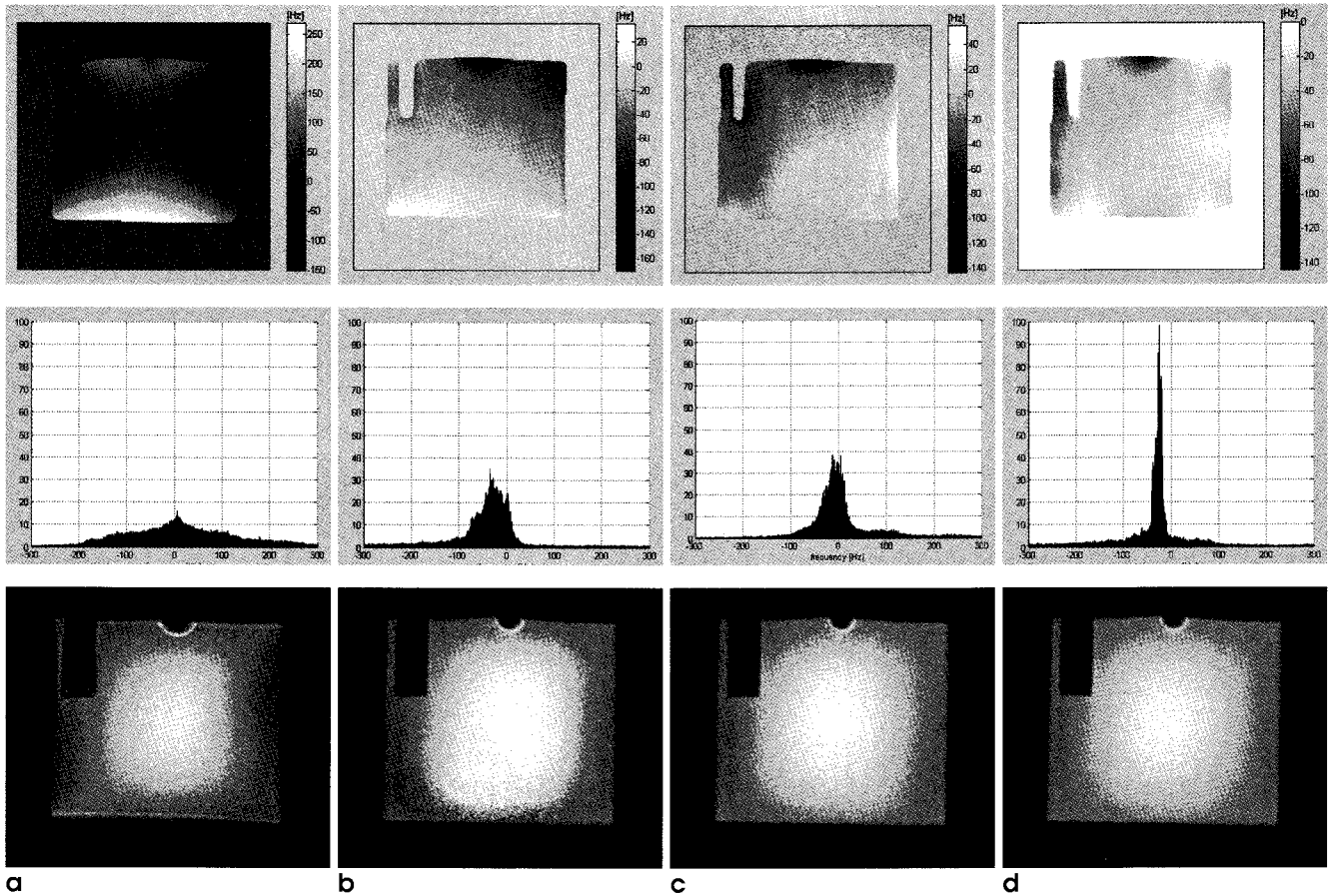


Fig. 3. Field inhomogeneity maps (top), spectral distributions(middle), and reconstructed images (bottom) with linear shimming and iterative application of higher order shimming. Linear shimming only (a), linear shimming and higher order shimming with iteration numbers of 1 (b), 2 (c), and 3 (d).

$$F^{-1} = (F^T F)^{-1} F^T$$

(9)

본 연구에서는 각 방향에 따라 대표적인 Δa 를 구하였다. 즉, axial 방향에서는 자장패턴 X2-Y2, XY, X, sagittal 방향에서는 Z2, ZY, Y, 그리고 coronal 방향에서는 ZX, Z에 관한 Δa 를 구하여 shimming에 적용하였다.

결 과

주자장의 불균일도를 고차 shimming을 통해 반복적으로 보정하여, 주자장을 균일하게 만들었고, 초고속 영상 기법인 나선주사영상 기법으로 고해상도 영상을 얻을 수 있었다. 고차 shimming을 하기 위해 x, y, z에 해당하는 선형 성분을 우선 보정해야 한다. 이는 반복적으로 주자장을 보정하는 방식에서 반복횟수를 줄여주는데, 선형 성분에 관한 shimming은 x, y, z 방향에 대한 gradient amplifier의 offset 값을 변화시킴으로써 주파수 스펙트럼의 FWHM(Full Width at Half Maximum)이 최소가 되도록 한다. 불균일도 map을 얻기 위한 영상은 repetition time(TR)을 1000 ms, echo train

length (ETL)를 8로 하고, phase encoding 수를 64 step으로 하여 axial, sagittal, coronal에 대한 세 방향의 불균일도 map을 얻었다.

나선주사영상 방법은 측정된 데이터의 k-space 궤적이 나선형태인 영상기법으로 dc 부터 높은 주파수 성분까지의 데이터를 한번의 스캔, 또는 interleaving 방법으로, 가장 효율적으로 측정하는 방법이라고 할 수 있다 (2). Fig.3에서 상단은 x, y, z의 선형 성분의 shimming과 고차 shimming에 의해 보정된 불균일도 map을 나타내고, 중단은 주파수 분포를 나타내며, 하단은 불균일도에 따른 나선주사영상을 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 선형 shimming만으로 얻은 결과이고, Fig. 3(b)-(d)는 선형 shimming 후 고차 shimming을 반복적으로 적용한 결과를 나타낸다. 선형 shimming 결과에 대한 불균일도 map의 주파수 분포와 3회의 고차 shimming을 적용한 불균일도 map의 주파수 분포를 비교해보면, 고차 shimming을 적용한 경우 주파수 분포가 좁은 영역으로 한정되는 것을 알 수 있으며, 이는 주자장의 불균일도가 상당히 개선되었음을 나타낸다. 나선주사영상의 경우 주자장의 불균일도에 의한 영향은 일반적인 영상기법(스핀에코 또는 경사자계-에코 영상기법) 보다 상

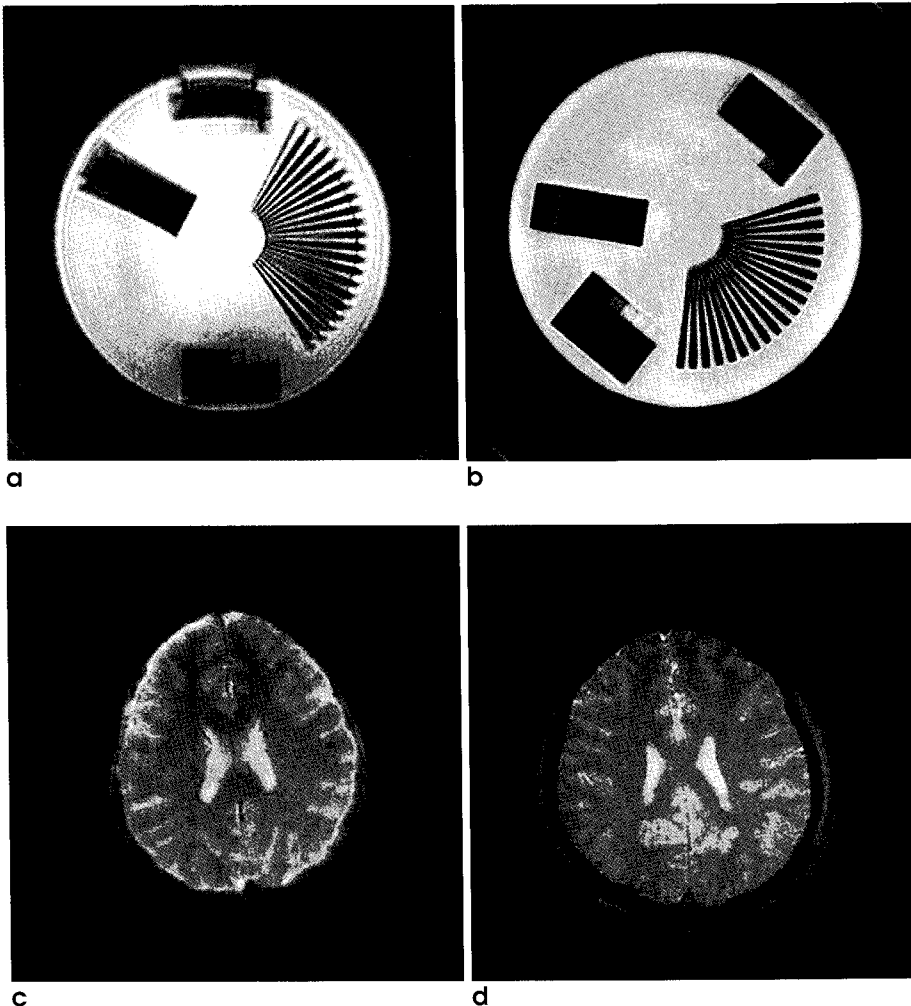


Fig. 4. Phantom and in-vivo head images obtained by spiral scan technique with linear shimming only (a and c), and linear and high order shimming (b and d).

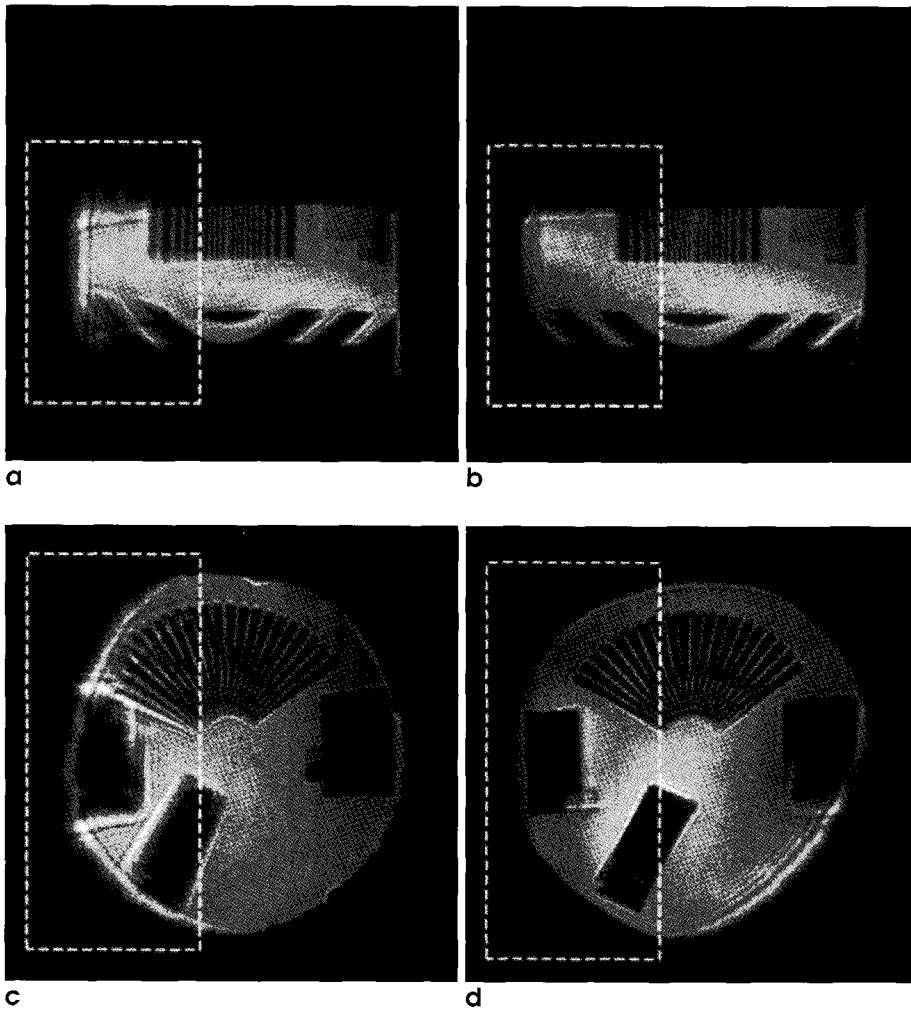


Fig. 5. Phantom images under high inhomogeneity obtained by the spiral scan technique with linear shimming only (**a** and **c**), and with linear and localized higher order shimming (**b** and **d**). The region of interest shown in dotted lines was located 16 cm off from the center to test the localized shimming.

당히 민감하게 나타난다. Fig. 3의 나선주사영상은, 경사자계에 코에 기반한 나선주사영상 시퀀스를 사용하였고, repetition time은 2s, 에코 time는 7ms, 영상 matrix의 크기는 256×256, rf회전 각도는 90°, interleaves 수를 8로 하였다. 각 interleave 에서의 측정 window는 48 ms로서, 일반적인 영상 기법이 10 ms 이내인 것에 비하여 4~5배 정도 긴 측정 window를 갖는다. 고차 shimming을 적용한 영상(Fig. 3(d) 하단)이 선형 shimming 만을 적용한 나선주사 영상(Fig. 3(a) 하단)에 비하여 예지 영역에서 blur가 적은 것을 알 수 있다

Fig. 4는 고차 shimming을 적용한 후, 나선주사영상시퀀스를 사용하여 얻은 resolution 팬텀과 두부영상이다. 복잡한 구조물의 팬텀과 두부에서도 고차 shimming을 통한 영상의 해상도 개선을 확인 할 수 있다.

Fig. 5는 높은 불균일 자장에서 magnet의 중심에서 16 cm 정도 벗어난 곳의 국부영역에 대하여 고차 shimming을 적용한 결과이다. Magnet 중심보다 주자장의 불균일도가 심한 국부영역에서의 고차 shimming은 불균일도 map에서 선택된 영역에

대해서만 spherical harmonics로 불균일도를 보정하는 방법이다. Fig.5(a)와(c)는 선형 shimming으로 주자장을 보정하여 얻은 나선주사영상이고, (b)와 (d)는 선택된 국부영역(점선으로 표시한 영역)에 대한 고차 shimming으로 보정 후 얻은 나선주사영상이다. 선택된 영역과 선택되지 못한 영역간의 영상의 개선은 현격한 차이가 있다. Fig.5에서 보듯이 off-center에 위치한 심한 불균일 자계에서도 국부 shimming을 통한 영상의 개선을 확인 할 수 있었다(왼쪽 영역). Fig.5의 오른쪽 영역에서 볼 수 있듯이 전체 영역의 shimming과 달리 국부영역의 shimming은 때로는 선택되지 않은 영역에서의 화질 저하를 가져올 수도 있다. 관심 영역 바깥 부분의 영상은 필요에 따라 clipping 을 하거나 saturation을 시킬 수도 있다.

결 론

3 Tesla의 고자장에서 자기공명영상은 높은 신호대잡음비와 스펙트럼의 분리 등의 장점이 있지만, 경사자계 대비 주자장의 불균일도는 증가하여 영상의 blur나 위상의 왜곡 등이 발생할

수 있다. 특히, 나선주사영상기법과 EPI등의 초고속 영상기법은 interleave당 측정시간이 다른 시퀀스에 비해 상대적으로 길기 때문에 상당히 균일한 주자장을 필요로 한다.

본 논문에서는 고해상도의 나선주사영상을 얻기 위해, 주자장을 균일하게 보정하기 위한 효과적인 고차 shimming 방법을 제안하였다. 즉 FSE 기법과 한번의 스캔으로 axial, sagittal, coronal 방향의 불균일도 map을 얻는 방법을 통해 3차원 공간에 대한 주자장의 불균일도를 짧은 시간 안에 측정 할 수 있었다. 불균일도 map을 의사역행렬 변환을 통한 spherical harmonics 분석으로 고차 shimming에 적용하였다. 또한 magnet 중심보다 주자장의 불균일도가 상대적으로 높은 외곽의 국부영역에 대해서도 고차 국부 shimming으로 신뢰성이 높은 영상을 얻을 수 있었다.

제안한 방법은 고차장에서 균질한 주자장을 신속하게 만들 수 있는 방법으로, 나선주사영상과 같은 다양한 초고속 영상 기법에서 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

1. Irarrazabal P, Meyer CH, Nishimura DG, Macovski A. Inhomogeneity correction using an estimated linear field map. *Magn Reson Med* 1996;35:278-282
2. Ahn CB, Kim PK, Lim JW, et al. High-resolution Spiral-scan Imaging at 3 Tesla MRI. *J. Korean Soc. Magn. Reson. Med.*2006;10:108-116
3. Ghiglia DC, Pritt MD. Two-dimensional phase unwrapping: theory, Algorithm, and Software. New York: Wily, 1998
4. Ahn CB, Jo JM, Cho ZH. Magnetic field homogeneity correction algorithm using pseudoinversion formula for NMR imaging. *Rev.Sci.Instrum* 1986;57(4):683-688
5. Ahn CB, Kim JH, Cho ZH, High-speed spiral-scan Echo Plannar NMR image-I, *IEEE Trans Med Imag* 1986;5:1-6
6. Bernstein MA, King KF, Zhou XJ. *Handbook of MRI Pulse Sequence*. New York: Elsevier, 2004

Higher Order Shimming for Ultra-fast Spiral-Scan Imaging at 3 Tesla MRI System

P.K. Kim¹, J.W. Lim², and C.B. Ahn¹

¹Kwangwoon University, ²ISOL Technology Co.

Purpose : To acquire high-resolution spiral-scan images at higher magnetic field, high homogeneous magnetic field is needed. Field inhomogeneity mapping and in-vivo shimming are important for rapid imaging such as spiral-scan imaging. The rapid scanning sequences are very susceptible to inhomogeneity. In this paper, we proposed a higher-order shimming method to obtain homogeneous magnetic field.

Materials and Methods : To reduce measurement time for field inhomogeneity mapping, simultaneous axial, sagittal, and coronal acquisitions are done using multi-slice based Fast Spin echo sequence. Acquired field inhomogeneity map is analyzed using the spherical harmonic functions, and shim currents are obtained by the multiplication of the pseudo-inverse of the field pattern with the inhomogeneity map.

Results : Since the field inhomogeneity is increasing in proportion to the magnetic field, higher order shimming to reduce the inhomogeneity becomes more important in high field imaging. The shimming technique in which axial, sagittal, and coronal section inhomogeneity maps are obtained in one scan is developed, and the shimming method based on the analysis of spherical harmonics of the inhomogeneity map is applied. The proposed technique is applicable to a localized shimming as well. High resolution spiral-scan imaging was successfully obtained with the proposed higher order shimming.

Conclusion : Proposed pulse sequence for rapid measurement of inhomogeneity map and higher order shimming based on the inhomogeneity map work very well at 3 Tesla MRI system. With the proposed higher order shimming and localized higher order shimming techniques, high resolution spiral-scan images are successfully obtained at 3 T MRI system.

Index words : Higher order shimming
Spiral-scan imaging
Spherical harmonics
Localized higher order shimming

Address reprint requests to : Chang Beom Ahn, Ph.D., VIA-Multimedia Center, Kwangwoon University
447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea
Tel. 82-2-940-5148 Fax. 82-2-909-3159 E-mail: cbahn@kw.ac.kr