

# 저자장 자기공명영상에서 위상-크기 결합 밀도 함수를 이용한 자동 불균일 자장 보정 물-지방 영상 기법

김 판 기 · 안 창 범

**목적 :** 0.35 Tesla의 저자장 자기공명영상 시스템에서 인체 조직의 물 성분 또는 지방 성분의 영상을 얻는데 있어서 주자장의 불균일도를 two-point Dixon 방법을 기반으로 보정하는 새로운 방법을 모색하였다.

**대상 및 방법 :** Two-point Dixon 방법을 사용하여 물과 지방의 위상이 동상일 때와 역상일 때의 영상들을 얻은 후 그 영상들로부터 위상과 크기의 위상-크기 결합 밀도 함수를 계산하고, 이를 통해 물과 지방의 영역을 분리하여 3차원 볼륨의 물 영역에서의 주자장의 불균일도 패턴을 분석하고 이를 반복적으로 보정하여 주자장의 불균일도를 개선하였다.

**결과 :** 제안한 영상 기법으로 인체의 여러 부위에서 주자장의 불균일도를 보정한 물과 지방 영상을 얻을 수 있었다. 삼차원 보정을 통하여 멀티 슬라이스 전체 영상에서 균일하게 물 또는 지방만의 영상을 얻을 수 있었다.

**결론 :** 위상-크기 결합 밀도 함수를 통하여 물과 지방의 영역을 분리할 수 있었고, 이를 이용하여 자장의 불균일도를 분석하고 보정할 수 있었다. 제안한 방법을 통해 주자장의 불균일도가 월등히 개선된 물 또는 지방 영상을 얻을 수 있었다.

## 서 론

자기공명영상에서 물과 지방 성분이 분리된 영상을 얻기 위해 사용되는 지방-물 분리법 (fat-water separation) 은 지방 조직으로 둘러싸여 있는 부위에서 물 조직을 더욱 잘 관찰 할 수 있도록 하거나 chemical shift artifact 에 의한 영향을 줄이기 위한 목적으로 사용되고 있고(1), 최근에는 지방 영상 자체를 의학적으로 이용하는 목적으로도 사용되고 있다 (2-6).

지방 신호를 소거하기 위해서는 물과 지방 성분의 주파수 차이를 이용하는 주파수 선택적 RF 펄스(7), T1 이완 시간의 차이를 이용하는 short-time inversion recovery(STIR)(8), 그리고 두 성분간의 위상차이를 이용하여 지방 신호를 소거하는 Dixon(9) 방법 등이 있다. 상기한 방법들이 많은 장점을 가지

고 있음에도 불구하고 0.35 Tesla와 같은 저자장의 시스템에서는 적용하기 어려운 점이 있다. 우선, 물과 지방 신호간의 주파수 차이가 50 Hz 정도이기 때문에 주파수 선택적 RF 펄스를 이용하기 위해서는 20 ms 이상의 긴 RF 펄스가 필요할 뿐만 아니라 주자장이 균일해야 한다. 그리고 T1 이완 시간의 차이를 이용하는 경우에는 영상의 신호대잡음비(signal-to-noise ratio)가 낮고, T1이 비슷한 다른 부위가 소거되는 단점이 있다. 이에 반해 물과 지방신호의 위상차이를 이용한 방법은 동상(in-phase)과 역상(out-of-phase)의 에코 위치 차이가 약 10 ms 이기 때문에 저자장의 MR 시스템에도 상대적으로 적용이 용이하다. 그러나 이 방법 또한 주자장의 균일도에 민감하다는 단점이 있다.

물과 지방의 위상차를 이용한 Dixon 방법은 주자장의 균일도에 민감하기 때문에 이를 해결하기 위해 three-point

대한자기공명의과학회지 15:57-66(2011)

광운대학교 전기공학과

\*이 논문은 2010년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원과 지식경제부 지원 국제공동기술개발사업의 지원에 의해 연구되었음.

접 수 : 2010년 11월 22일, 수 정 : 2011년 1월 5일, 채 택 : 2011년 1월 18일

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

Dixon(3PD) 방법(10, 11)이 제안되었다. 그러나 이 방법은 기존의 two-point Dixon(2PD) 방법에 비해 추가적으로 한번의 영상을 더 얻기 때문에 측정시간이 2PD에 비해 길어지는 단점이 있다. 이런 3PD의 단점을 해소하기 위해 extended two-point Dixon(E2PD) 방법(12, 13)이 제안되었다. 3PD와 E2PD 방법 모두에서 불균일 자장 맵을 얻는 과정에서 불균일 자장에 의한 위상이 2배 증가하게 하는데, 이로 인하여 보정할 수 있는 최대 불균일 자장의 크기는 1/2로 줄어들게 된다. 이것을 보완하기 위하여 접힌(wrapping) 위상을 보정하는 위상 펼침(unwrapping) 알고리즘이 사용 되는데 이 위상 펼침 알고리즘은 영상에서의 잡음이나 불연속적인 영역 등의 상황에 따라 잘 동작하지 않을 수 있다(14). 이러한 위상 접힘 문제와 3PD에서의 측정시간을 해결하기 위해 quality 맵을 기반으로 region-growing 방법을 통해 불균일 자장 맵을 얻는 방법(15)이 제안되었지만, 여전히 잡음과 불균일 자장 등에 취약하다는 한계가 있다(16).

본 논문은 진단에 사용되기 위한 물-지방 분리 영상을 얻기 위해 동상과 역상의 영상으로부터 불균일 자장 맵을 얻는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 2PD에 기초하고 있기 때문에 추가적인 스캔이 필요없고, 삼차원 볼륨에서 위상-크기 결합밀도 함수 (Joint Phase Magnitude density Function: JPMF)를 사용하여 물 성분을 구분함으로써 위상 펼침을 적용하지 않은 상태에서 기존의 위상기반 보정방법 보다 비균일 자장의 보정범위를 2배 확장할 수 있다. 또한 전체 슬라이스에서의 물과 지방 성분의 정보를 모두 사용하여 잡음 등의 영향에 강인하고, 3차원 볼륨에 대한 불균일 자장을 보정하므로 전체 슬라이스에서 균일하게 지방이 소거된 영상을 얻을 수 있다.

## 대상 및 방법

### 동상 및 역상 영상의 특성

물과 지방 신호를 분리하기 위해 기존의 two-point Dixon 방법에서와 같이 물과 지방 신호의 위상차가 0°와 180°인 동상(I)와 역상(Q)에서 얻어진 복소수 형태의 재구성 영상은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$I = (W + F)e^{i\phi_0}e^{i\phi_1} \quad (1)$$

$$Q = (W - F)e^{i\phi_0}e^{i\phi_2}e^{i\phi} \quad (2)$$

위의 식에서  $e^{i\phi_0}$ 는 시스템의 지연이나 필터 특성과 같이 시스템의 특성에 의해 동상과 역상영상에서 공통적으로 발생하는 위상을 나타내고,  $e^{i\phi_1}$ 과  $e^{i\phi_2}$ 는 슬라이스 위치에 따른  $B_0$  필드의 차이에 의해 발생하는 동상과 역상에서의 오프셋 위상을 나타낸다. 그리고  $e^{i\phi}$ 는 동상과 역상의 에코 시간 차이로 발생하는 불균일 자장에 의한 위상이며,  $W$ 와  $F$ 는 각각 물과 지방 성분 신호를 나타낸다.

물과 지방 영상은 보통 다채널 코일로 멀티 슬라이스 영상을

얻게 되는데, 이때 얻어진 멀티슬라이스에서 물과 지방 정보를 이용해 3차원의 불균일 자장의 패턴을 분석하는데 사용한다. 본 연구에서 사용된 다채널 코일에서 얻은 데이터는 채널 간의 위상 차이가 크지 않았고, 또한 각 채널에서의 잡음은 독립적이라고 가정하여 채널 데이터를 합하여 신호대잡음비를 개선하였다. 만약 채널의 위상이 상이할 경우, 보정이 선행되어야 한다. 또한 각 채널의 잡음에 상관도가 존재할 경우 이를 이용하여 신호대잡음비를 최대화시키는 합산이 필요하다 (17). 다채널 코일에서  $n$ -번째 요소 코일로 측정된  $z$ -위치의 슬라이스에서 동상( $I_z^n$ )와 역상 영상( $Q_z^n$ )의 공통위상( $\phi_0$ )을 제거하고 각 채널에서 얻어진 신호를 합쳐서 신호대잡음비가 개선된 동상( $I_z'$ )와 역상( $Q_z'$ ) 영상은 아래와 같이 주어진다.

$$I_z' = \sum_n |I_z^n| = (W + F) \quad (3)$$

$$Q_z' = \sum_n \left( Q_z^n \cdot \frac{(I_z^n)^*}{|I_z^n|} \right) = (W - F)e^{i\phi}e^{i(\phi_2 - \phi_1)} \quad (4)$$

식(4)에서 슬라이스 위치에 따른 오프셋 위상( $e^{i(\phi_2 - \phi_1)}$ )은 일정하므로 DC 성분(에코 신호의 피크점의 위상)의 위상으로부터 구할 수 있다. 즉,

$$(\phi_2 - \phi_1) \cong \angle iFFT(Q_z')_{DC} = \phi_{off} \quad (5)$$

식(5)의 오프셋 위상( $\phi_{off}$ )을 제거하면 역상 영상은 아래와 같이 나타내진다.

$$\hat{Q}_z = Q_z' e^{-i\phi_{off}} = (W - F)e^{i\phi} \quad (6)$$

불균일 자장에 의한 위상( $\phi$ )이 남겨진  $\hat{Q}_z$ 에서  $\phi$ 를 구하기 위하여 다항식 fitting 방식을 사용하는 것이 적절하지만 물과 지방의 180도의 위상차이로 인해 먼저 물과 지방의 영역을 구분하는 일이 필요하다.

### Joint Phase-Magnitude Density Function (JPMF)의 생성

물과 지방의 영역을 구분하기 위하여 동상과 역상 영상의 크기와 위상을 고려한 위상-크기 결합 밀도 분포 함수 (Joint Phase-Magnitude Density Function, JPMF)를 제안하였다. 이 JPMF는 식(3)과 (6)의  $I_z'$ 와  $\angle \hat{Q}_z$ 의 결합 밀도를 이차원 공간에 나타낸 것으로 아래의 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$JPMF(u,v) = \sum_{z=1}^k (histo(u\Delta p \leq \angle \hat{Q}_z \langle (u+1)\Delta p, v\Delta m \leq I_z' \langle (v+1)\Delta m)) \quad (7)$$

식(7)에서  $\Delta p$ 와  $\Delta m$ 의 위상과 크기의 단위 구간을 나타내고,  $histo(\cdot)$ 는 주어진 조건을 만족하는 픽셀 개수를 카운트하

는 2차원 히스토그램을 뜻한다. 모든 슬라이스들 (삼차원볼륨)에 대한 위상과 크기 분포들을 누적하면 삼차원 볼륨에 대한 이차원의 JPMF가 만들어진다.

Fig. 1은 식(7)에 의해 만들어지는 JPMF를 개념적으로 나타낸 것으로,  $R_W$ 는 물 성분의 분포이고  $R_F$ 는 지방 성분의 분포를 나타내고, 가로축은 위상을, 세로축은 영상의 크기를 나타낸다. 이렇게 위상과 크기에 대한 2차원 JPMF를 사용함으로써 물과 지방의 180도 위상차이뿐만 아니라, TR과 TE에 의한 물과 지방의 신호 크기 차이를 활용하여 물과 지방의 분리가 더욱

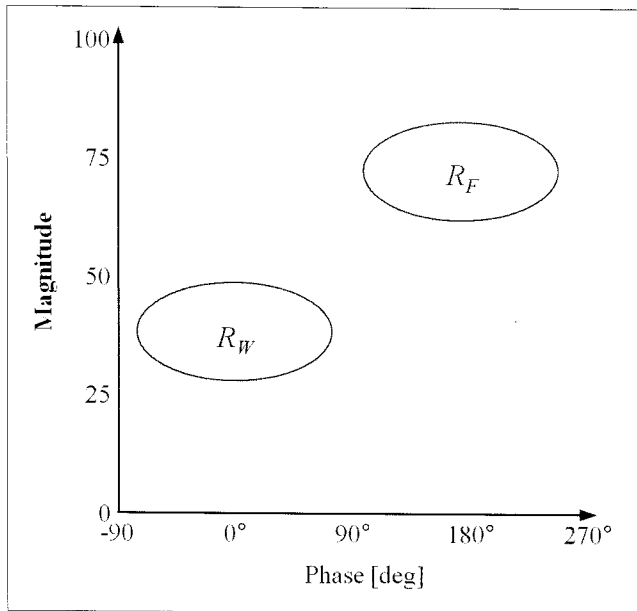


Fig. 1. A joint phase-magnitude density function for water-fat imaging is schematically shown, where  $R_W$  and  $R_F$  denote water and fat ranges, respectively.

용이해진다. 또한 각 슬라이스에서의 JPMF를 누적하여 전체 슬라이스에 대한 JPMF를 생성함으로써 잡음 등의 영향을 덜 받음과 동시에 전체 슬라이스에서 안정된 불균일 자장 보정을 이룰 수 있다.

Fig. 2는 스핀에코 시퀀스로 물과 기름(식용유)을 채운 팬텀의 sagittal 방향의 영상과 그 JPMF를 보였다. Fig. 2의 (a)는 팬텀에서 sagittal 방향의 동상 크기 영상이다(TR/TE = 500/26(ms)). (b)는 역상의 영상인  $\hat{Q}_z$  영상의 위상이고 (c)는 (a)와 (b)를 이용해서 만들어진 JPMF로 물과 지방의 성분이 군집하여 분포하는 것을 볼 수 있다. 또한 JPMF를 사용함으로써 불균일 자장에 의한 위상 보정 범위가  $-180^\circ \sim 180^\circ$  범위로 넓어짐을 알 수 있다.

### 불균일 자장 맵의 생성

불균일 자장에 의한 왜곡이 없는 물-지방 분리 영상을 만들기 위해서는 불균일 자장 맵을 이용하여 위상을 보정한다. 불균일 자장 맵은 상기한 JPMF의 물 범위( $R_W$ )에 해당하는 위상과 크기를 가진 픽셀들의 위치를 모든 슬라이스들로부터 찾은 물 성분 영역( $A_W$ )에서의 위상을 통해 구할 수 있다. 즉, 이 JPMF에서 물 성분의 영역( $A_W$ )은 식(8)과 같이 추출된다.

$$A_W = \{(x,y,z) | \angle \hat{Q}_z(x,y) \in R_W, I'_z(x,y) \in R_W\} \quad (8)$$

물 성분 영역( $A_W$ )은 식(8)을 통해 JPMF에서  $R_W$ 에 해당하는  $I'_z$ 에서의 크기와  $\hat{Q}_z$ 의 위상을 만족하는 픽셀들의 위치에 해당하게 되고, 이 위치들이 각 슬라이스 영상에서의 물 성분의 영역( $A_W$ )이다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 Fig. 2(c)의 JPMF에서 물 성분 범위( $R_W$ )와 그에 해당하는 물 성분의 영역( $A_W$ )을 흰색으로 표시한 것이다.

제안된 방법으로 만들어진 JPMF로부터 물 성분의 영역

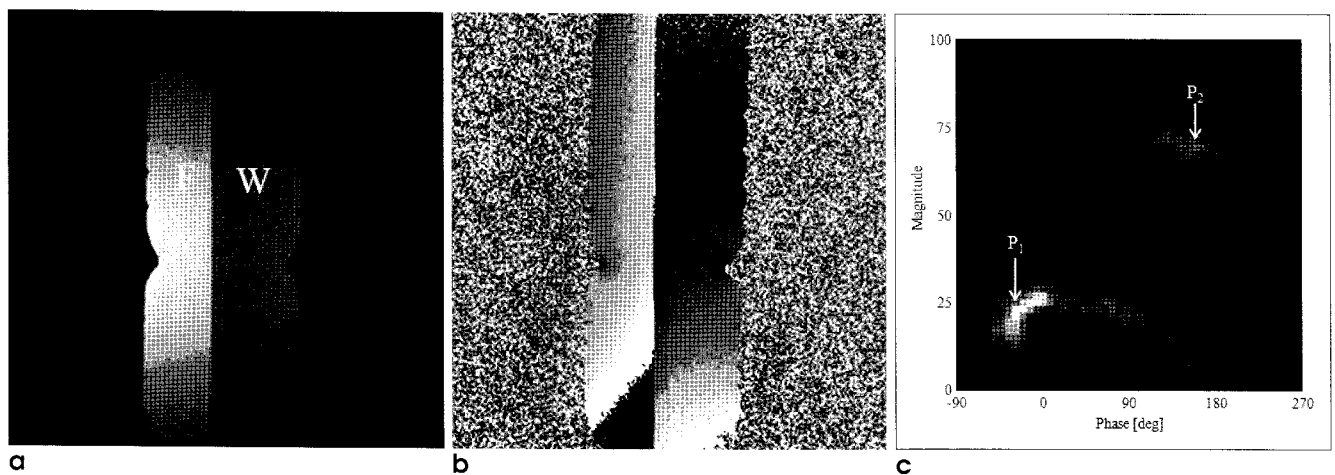


Fig. 2. Water-fat images and corresponding JPMF for a phantom. Magnitude in the in-phase image (a), phase in the out-of-phase image (b), and corresponding JPMF (c). Fat and water are denoted by "F" and "W", respectively in (a). A spin echo-based Dixon sequence was used with repetition time (TR) of 500 ms, and echo time (TE) of 26 ms.  $P_1$  and  $P_2$  in the JPMF denote the peak populations for water and fat.

## 김판기 외

( $A_W$ )는 다음과 같은 방법으로 구해진다.

Step 1, JPMF에서 최대 값을 가지는 지점( $P_1$ )을 찾는다.

Step 2,  $P_1$ 을 시작점으로 하여  $P_1$ 의 값의 30%가 되는 영역까지 region growing하여  $P_1$ 을 포함하는 범위( $R_{P_1}$ )을 정의한다. 이때, 물과 지방 성분이 공존하는 픽셀들을 배제하기 위하여 크기 기반으로 경계를 설정하여 region growing의 범위를 제한할 수 있다.

Step 3, 물, 지방과 같이 두개의 성분으로 이루어진 경우, JPMF에서 두번째 영역을 정의하기 위해  $R_{P_1}$  영역을 제외한 JPMF에서 최대 값을 가지는 지점( $P_2$ )를 찾는다.

Step 4,  $P_2$ 을 시작점으로 하여  $P_2$ 의 값의 30%가 되는 영역까지 region growing하여  $P_2$ 을 포함하는 범위( $R_{P_2}$ )을 정의한다.

Step 5,  $P_1$  과  $P_2$ 의 크기를 비교하여 지방과 물 신호를 구분한다. 이에 따른  $R_{P_1}$ 과  $R_{P_2}$ 도 물이나 지방 신호 범위로 구분된다.

Step 6, 식(8)을 이용하여 물 성분 범위( $R_W$ )로부터 물 성분의 영역( $A_W$ )을 만든다.

물 성분의 영역( $A_W$ )에서 위상 값을 이용하여 식(9)와 같이 삼차원의 다항식으로 전개하면 불균일 자장 패턴을 계산할 수 있다(18-20). 불균일 자장을 2차 다항식으로 전개한 것은 일반적으로 불균일 자장의 변화가 급격하지 않고, 또한 차수를 높게 설정하였을 경우 잡음이나 기타 요인으로 인한 불안정한 fitting을 배제하기 위함이다. 제안된 방법에서는 반복적인 보정을 적용하여 결과적으로 고차 보정이 안정적으로 이루어지도록 하였다.

$$\phi(x,y,z) = a_1 \cdot z^2 + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot y^2 + a_4 \cdot xy + a_5 \cdot yz + a_6 \cdot xz + a_7 \cdot x + a_8 \cdot y + a_9 \cdot z + a_{10} \quad (9)$$

식(9)에서  $x, y$ 는 각 슬라이스 영상에서의 좌표이고,  $z$ 는  $z$  위치의 슬라이스를 나타낸다. 이 다항식을 의사-역(pseudo-

inverse)연산으로  $a_1 \sim a_{10}$ 의 다항식 계수를 구하여 전체 영상 영역에서 불균일 자장 맵을 얻는다.

### 불균일 자장 보정

불균일 자장 맵을 이용하여 식(6)의  $\angle \hat{Q}_z$ 에 존재하는 불균일

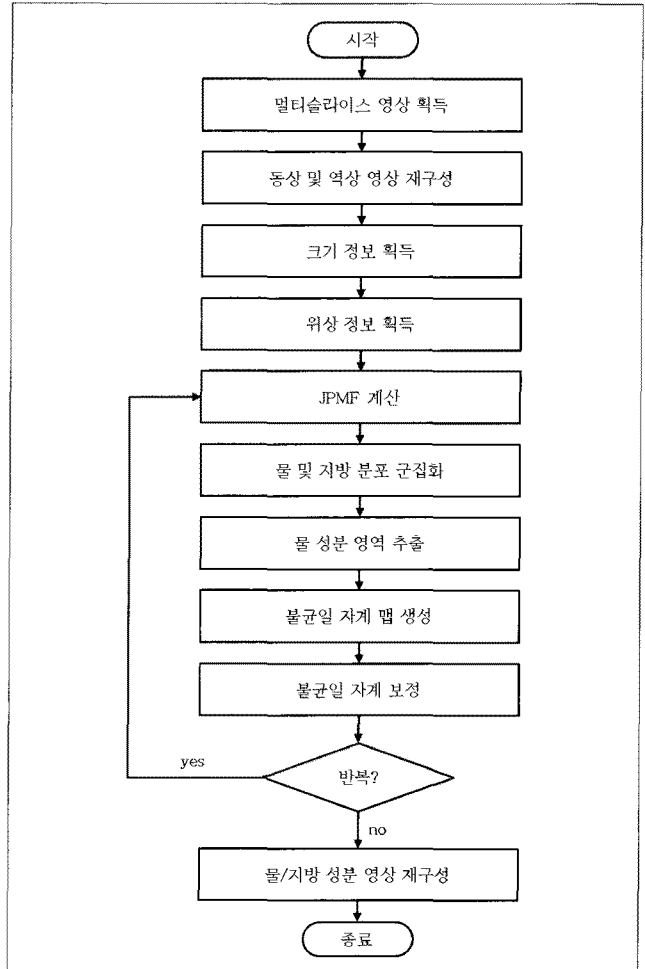


Fig. 4. Flow chart for the proposed water-fat imaging.

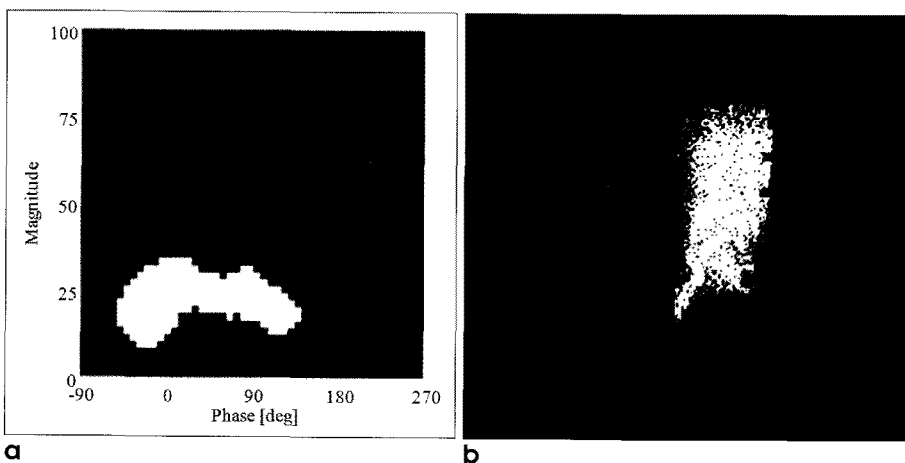


Fig. 3. Two dimensional range of water in the JPMF (a), and corresponding water region (b) in the phantom image shown in Fig. 2.

자장을 제거한다. 불균일 자장이 클 경우 얻어진 JPMF 및 이를 이용하여 정의된 물 영역이 정확하지 않을 수 있으므로 Fig. 4의 순서도에서처럼 반복적으로 불균일 자장을 보정하고, 보정된 영상들로부터 JPMF를 구하고 이로부터 다시 불균일 자장을 개선하는 과정을 반복한다(21).

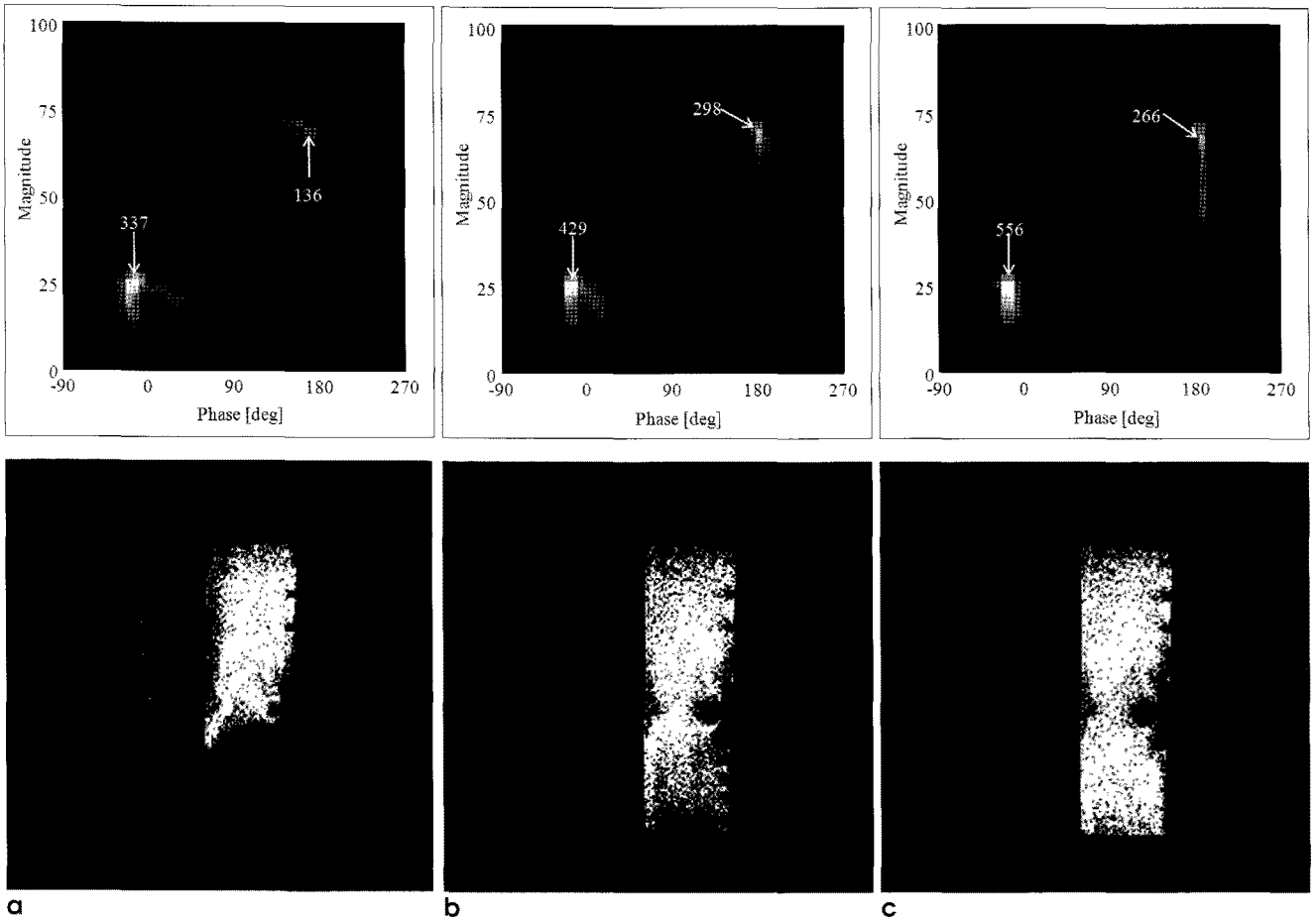
Fig. 5는 물-지방 팬텀에서 반복적인 불균일 자장 보정을 통한 JPMF와 물 성분 영역( $A_W$ )의 변화를 보여준다. 우선 불균일 자장을 보정하지 않은 Fig. 2(c)의 JPMF와 비교하여 불균일 자장을 1회 보정했을 때(Fig. 5(a)-top) JPMF 상의 물과 지방 성분의 분포가 더 응집되어 있는 것을 확인할 수 있고, 그에 따른 각 성분 분포의 최대 빈도점의 크기(화살표가 가리킨 위치에서의 크기)도 1회의 불균일 자장 보정을 통해 각각의 성분으로 모임으로써 최대 빈도점에서의 크기도 커짐을 알 수 있다. 또한 JPMF로부터 찾아진 물 성분 영역( $A_W$ )의 경우도 불균일 자장을 반복하여 보정할 때에 더 넓은 영역을 포함하게 된다.

불균일 자장이 보정된 물과 지방 영상은 아래와 같이 주어진다.

$$W = \frac{1}{2}(|I'| + \text{Real}(\hat{Q}_c)) \quad [10]$$

$$F = \frac{1}{2}(|I'| - \text{Real}(\hat{Q}_c)) \quad [11]$$

식[10]과 식[11]에서  $\hat{Q}_c$ 은 불균일 자장을 보정한 역상 영상이고,  $\text{Real}$ 은 복소수 값을 갖는  $\hat{Q}_c$ 의 실수 부분을 뜻한다. Fig.6은 본 논문에서 제안된 방법으로 불균일 자장을 1회(a), 3회(b)와 5회(c) 반복하여 보정한 물 성분 영상과 위상 맵(d-f), 그리고 5회 반복하여 보정한 지방 성분의 영상(g)이다. Fig. 6(h)에는 Fig. 6(a), (b), (c)에서 점선으로 표시된 곳의 단편을 나타낸 것으로 반복적인 불균일 자장 보정을 통해 물 성분의 신호가 영상 전체에서 균일하게 회복 됨을 확인할 수 있다. Fig. 6(h)의 물 성분 프로파일에서 지방 영역에 물 신호가 나타나는 것은 팬텀에 사용된 지방(식용유)에 물 성분이 내재된 이유로 판단된다. Fig. 2의 동상과 역상 영상에서 물과 지방 영역에서 ROI로 신호의 크기를 측정해보면 물의 신호는 동상과 역상 모두에서 거의 같은 크기로 나타나나, 지방 신호는 역상 영상에서 동상의 약 67% 정도로 나타난다. 이것으로부터 식용유 내에 물 성분이 존재하는 것을 알 수 있다.



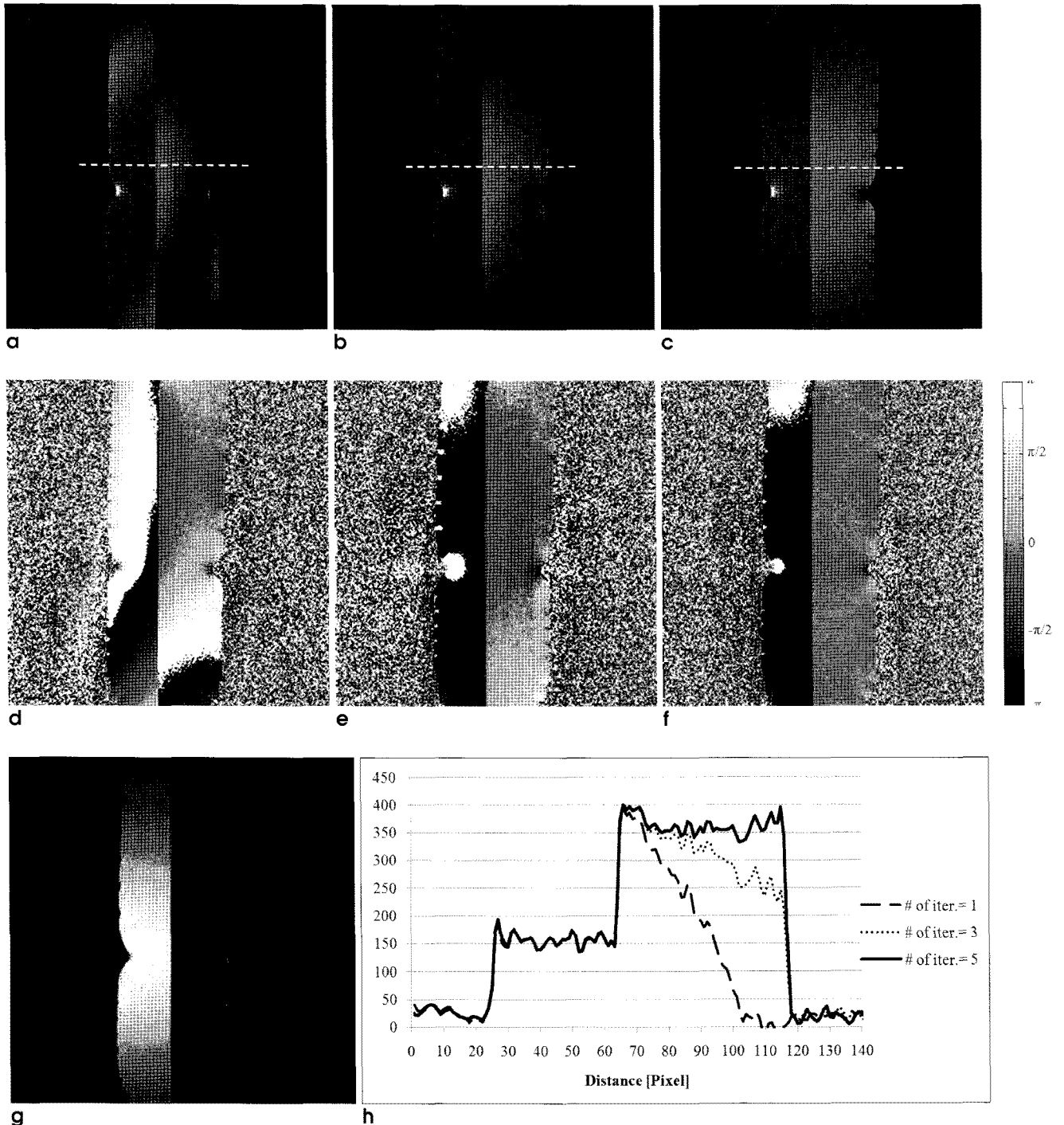
**Fig. 5.** Change of JPMF and corresponding water region as the number of iterations of the inhomogeneity correction increases. Numbers of iterations are 1(a), 2(b) and 3(c), respectively.

결 과

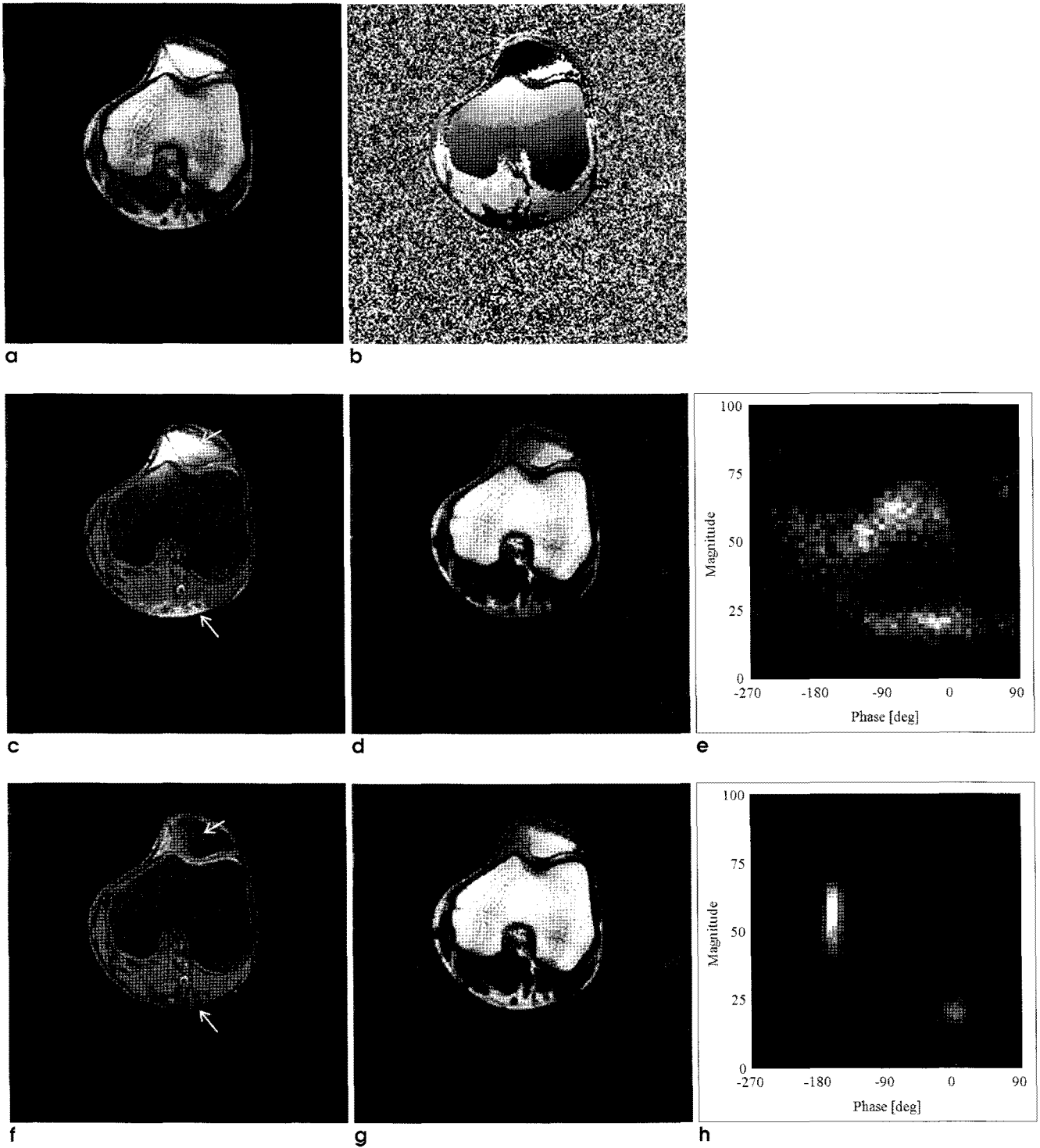
본 실험은 0.35 Tesla open MRI 장비(ISOL technology 사, Korea)를 이용하여 실험하였다. 제안된 방법을 위하여 스

핀에코 기반의 펄스 시퀀스의 refocusing RF pulse의 위치를 조절하여 동상과 역상의 시간차를 9.8 ms가 되는 두 영상을 얻었다( $TR/TE = 500/25(ms)$ ).

Fig. 7은 무릎에서 불균일 자장의 보정 횟수에 따른 물과 지방 성분 영상의 결과로써, (a)와 (b)는 동상의 크기 영상과  $\hat{Q}$



**Fig. 6.** Water images of the phantom with the number of iterations of the inhomogeneity correction are 1 (a), 3 (b), and 5 (c), respectively. Corresponding phase maps are shown in (d), (e), and (f), respectively. Fat image of the phantom after inhomogeneity correction (iteration number of 5) is shown in (g). The intensity profiles of the water images along the broken lines are shown in (h).

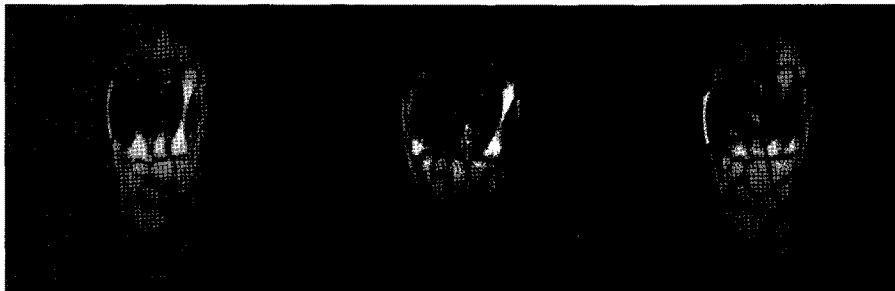


**Fig. 7.** In-vivo axial knee images of a volunteer. Magnitude of the in-phase image (a), phase of the out-of-phase image (b) obtained by a spin echo sequence at 0.35 T (TR = 500 ms, TE = 25 ms, FOV = 230 mm, spatial resolution = 0.89 mm, flip angle (FA) = 90°, slice thickness = 8 mm). Water image, fat image, and corresponding JPMF are shown in (c), (d), and (e), respectively before the inhomogeneity correction. Water image, fat image, and corresponding JPMF after the proposed inhomogeneity correction are shown in (f), (g) and (h), respectively. The number of iterations for inhomogeneity correction was 5. Note the improvements in the water images especially in the regions shown by the arrows.



**Fig. 8.** In-vivo multi-slice water (top) and fat (bottom) images of knee (a), hand (b), and shoulder (c) of volunteers are shown. They are obtained by a gradient echo-based Dixon sequence at 0.35T. The repetition time was 500 ms, TE for the out-of-phase and in-phase imaging was 9.8 ms and 19.6 ms, respectively. Other imaging parameters are: FOV = 250 mm, FA = 60°, Thickness = 5 mm, spatial Resolution = 0.97 mm (a); FOV = 230 mm, FA = 60°, Thickness = 3 mm, spatial Resolution = 0.89 mm (b); FOV = 250 mm, FA = 60°, Thickness = 5 mm, spatial Resolution = 0.97 mm (c).

a



b



c



의 위상 영상으로, 위상 영상에서 불균일 자장에 의해 위상 접힘이 있음을 알 수 있다. (c)과 (d)는 각각 불균일 자장을 보정하지 않았을 때의 물과 지방 영상이고, (e)는 이때의 JPMF로써 불균일 자장에 의한 영향으로 물과 지방이 구분이 잘 되지 않고, 각 성분의 위상이 넓게 퍼져 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 5회의 반복적인 보정을 통한 물 및 지방 영상과 그때의 JPMF를 각각 (f), (g), (h)에 나타내었다. 넓게 퍼져있던 물과 지방 성분의 위상이 2개의 영역으로 모임을 볼 수 있으며 (c)와 (f)의 결과 영상을 비교해 보면 반복적인 불균일 자장의 보정으로 왜곡이 줄어들어 지방 성분이 잘 소거된 것을 확인할 수 있다. 또한 5회 보정하여 얻어진 지방 영상(g)를 통해서 물과 지방이 잘 분리되고 있음을 알 수 있다.

본 논문에서 제안한 물-지방 분리 영상 기법은 전체 슬라이스에서 JPMF와 삼차원 불균일 자장 맵을 생성하기 때문에 전체 슬라이스에서 균일하게 물과 지방이 구분된 영상을 얻을 수 있다.

Fig. 8은 경사자계에코 기반의 펄스 시퀀스로 얻은 영상을 이용하여 얻은 물과 지방 성분 영상이다. 0.35 Tesla 시스템에서 경사자계-에코 펄스 시퀀스로 역상과 동상 영상을 얻기 위해서 TR은 500 ms로, TE는 각각 9.8 ms와 19.6 ms로 설정하였고, 불균일 자장을 5회 보정한 결과 영상이다. (a)는 무릎, (b)는 손, 그리고 (c)는 어깨에서의 물 성분 영상(위)과 지방 성분 영상(아래)을 나타낸 결과로써, 제안한 방법이 다양한 부위와 영상 기법에서도 잘 동작하고 있음을 알 수 있다.

## 고 찰

2-point Dixon 방법으로 얻은 동상과 역상 영상들로부터 위상과 크기에 대한 JPMF를 만들고, 이 JPMF에서 물과 지방 성분 분포 중 선택한 성분 영역에서의 위상 맵으로부터 불균일 자장 패턴을 추출하여 반복적으로 불균일 자장을 개선하는 방법을 제안하였다. 3차원 볼륨에서 위상과 크기의 2차원 결합분포 함수(JPMF)를 사용함으로써 기존의 위상만을 사용하여 물 영역을 구분하는 방법보다 자장의 불균일도 보정 범위를 최대 180°에서 360°로 확장시킬 수 있다 (위상 펼침을 사용하지 않았을 경우). 물과 지방이 공존하는 픽셀에서는 물과 지방의 분리가 어려워 질 수 있으나, 제안한 방법에서는 JPMF에서 크기 신호에 경계를 설정하여 물과 지방이 공존하는 픽셀들을 배제하고 물을 많이 포함하는 픽셀들의 위상에서 불균일 자장을 fitting 하여 전체 영역에서 불균일 자장을 보정하였다. 자기장의 불균일도가 비교적 완만하게 변화하기 때문에 물을 많이 포함하는 픽셀들만 이용하여도 전체 불균일 자장 패턴의 추정에는 어려움이 없다. 삼차원 볼륨에서 JPMF를 구함으로써 전체 볼륨 안에서 주요한 성분의 위상과 크기의 정보를 안정적으로 제시할 수 있음을 보였다.

물과 지방 신호의 상대적인 크기는 비교적 불균일 자장의 영향을 작게 받기 때문에 제안한 방법은 불균일 자장이 심한 경우

에서도 잘 동작할 수 있게 된다. 물과 지방 성분의 크기 차이는 TR, TE, FA 등과 같은 이미징 파라미터들로 결정될 수 있으므로 사전에 스캔 대상과 목적에 따라 물과 지방의 크기 차이가 극대화되는 이미징 파라미터를 정리해 두면 물과 지방 영상을 얻는데 유용할 것으로 판단된다.

## 결 론

본 논문에서는 Dixon 방식을 기반으로 하여 얻은 멀티슬라이스 영상들의 크기와 위상을 이용하여 JPMF를 생성하였다. 이 JPMF는 전체 슬라이스에서 얻었기 때문에 전체 슬라이스들의 위상과 크기를 나타낼 수 있을 뿐만 아니라, 물과 지방 성분 분포의 구분이 더 명확해 질 수 있었고 이를 통해 물의 영역을 선택적으로 추출할 수 있었다. 이렇게 물과 지방 성분을 선택적으로 분류할 수 있어서 선택된 성분만의 위상 정보로부터 삼차원 불균일 자장 패턴을 추출할 수 있었다. 또한 반복적인 불균일 자장 보정을 통해 전체 슬라이스에서 균일하게 원하는 성분을 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제안한 방법은 0.35 Tesla의 시스템에서 스핀에코 기반의 펄스 시퀀스와 경사자계 에코 기반의 펄스 시퀀스 모두에서 다양한 신체 부위에 대하여 잘 동작 함을 확인 할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Emmanuelle M, Javier B, Glyn J, Jean R, Xavier M, Anne C. Fat suppression in MR imaging: techniques and pitfalls. *Radiographics* 1999;19:373-382
2. Hussain HK, Chenevert TL, Londy FJ, et al. Hepatic fat fraction: MR imaging for quantitative measurement and display - early experience. *Radiology* 2005;236:1048-1055
3. Guiu B, Petit JM, Loffroy R, et al. Quantification of liver fat content: comparison of triple-echo chemical shift gradient-echo imaging and in vivo proton MR spectroscopy. *Radiology* 2009;250:95-102
4. O' Regan DP, Callaghan MF, Wylezinska-Arridge M, et al. Liver fat content and T2\*: simultaneous measurement by using breath-hold multiecho MR imaging at 3T-feasibility. *Radiology* 2008;247:550-557
5. Kellman P, Hernando D, Shah S, et al. Multiecho dixon fat and water separation method for detecting fibrofatty infiltration in the myocardium. *Magn Reson Med* 2009;61:215-221
6. Hu HH, Kim HW, Nayak KS, et al. Comparison of fat-water MRI and single-voxel MRS in the assessment of hepatic and pancreatic fat fractions in humans. *Obesity* 2010;18:841-847.
7. Keller PJ, Hunter WW Jr, Schmalbrock P. Multisection fat-water imaging with chemical shift selection presaturation. *Radiology* 1987;164:539-541
8. Bydder GM, Young IR. MR imaging: clinical use of the inversion-recovery sequence. *J Comput Assist Tomogr* 1985;9:659-675

9. Dixon WT. Simple proton spectroscopic imaging. *Radiology* 1984;153:189-194
10. Glover GH, Schneider E. Three-point Dixon Technique for true water/fat decomposition with B0 inhomogeneity correction. *Magn Reson Med* 1991;18:371-383
11. Glover GH. Multipoint dixon technique for true water and fat proton and susceptibility imaging. *Magn Reson Med* 1991;5:512-530
12. Skinner TE, Glover GH. An extended two-point Dixon algorithm for calculating separate water, fat, and B0 images. *Magn Reson Med* 1997;37:628-630
13. Coombs BD, Szumowski J, Coshov W. Two-points Dixon technique for water-fat signal decomposition with B0 inhomogeneity correction. *Magn Reson Med* 1997;38:884-889.
14. Ghiglia DC, Pritt MD. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithm, and software. New York: John Wiley & Sons; 1998
15. Ma J. Breath-hold water and fat imaging using a dual-echo two-point Dixon technique with an efficient and robust phase-correction algorithm. *Magn Reson Med* 2005;52:425-419
16. Schmidt MA, Fraser KM. Two-point Dixon fat-water separation: improving reliability and accuracy in phase correction algorithm. *JMRI* 2008;27:1122-1129.
17. Pruessmann KP, et al. SENSE: sensitivity encoding for fast MRI. *Magn Reson Med* 1999;42:952-962
18. Ahn CB, Jo JM, Cho ZH. Magnetic field homogeneity correction algorithm using pseudoinversion formula for NMR imaging. *Rev Sc. Instrum* 1986;57(4):683-688
19. Irarrazabal P, Meyer CH, Nishimura DG, Macovski A. Inhomogeneity correction using an estimated linear field map. *Magn Reson Med* 1996;35:278-282
20. Bernstein MA, King KF, Zhou XJ. Handbook of MRI Pulse Sequence. New York: Elsevier; 2004
21. Reeder SB, Wen Z, Yu H, et al. Multicoil Dixon chemical species separation with an iterative least-squares estimation method. *Magn Reson Med* 2004;51:35-45

J. Korean Soc. Magn. Reson. Med. 15 :57-66(2011)

## Water-Fat Imaging with Automatic Field Inhomogeneity Correction Using Joint Phase Magnitude Density Function at Low Field MRI

Pan-Ki Kim and Chang-Beom Ahn

*Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University*

**Purpose :** A new inhomogeneity correction method based on two-point Dixon sequence is proposed to obtain water and fat images at 0.35T, low field magnetic resonance imaging (MRI) system.

**Materials and Methods :** Joint phase-magnitude density function (JPMF) is obtained from the in-phase and out-of-phase images by the two-point Dixon method. The range of the water signal is adjusted from the JPMF, and 3D inhomogeneity map is obtained from the phase of corresponding water volume. The 3D inhomogeneity map is used to correct the inhomogeneity field iteratively.

**Results :** The proposed water-fat imaging method was successfully applied to various organs. The proposed 3D inhomogeneity correction algorithm provides good performances in overall multi-slice images.

**Conclusion :** The proposed water-fat separation method using JPMF is robust to field inhomogeneity. Three dimensional inhomogeneity map and the iterative inhomogeneity correction algorithm improve water and fat imaging substantially.

**Index words :** Water-fat imaging  
Inhomogeneity correction  
Low-field MRI  
Joint phase-magnitude density function

Address reprint requests to : Chang-Beom Ahn, Department of Electrical Engineering, 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