

# Influence of Sensor Noise on the Localization Error in Multichannel SQUID Gradiometer System

K. Kim<sup>\*,a</sup>, Y. H. Lee<sup>a</sup>, H. Kwon<sup>a</sup>, J. M. Kim<sup>a</sup>, Y. S. Chung<sup>a</sup>, C. S. Kang<sup>a,b</sup>,  
I. S. Kim<sup>a</sup>, Y. K. Park<sup>a</sup> and S. G. Lee<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Biomagnetism Research Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

<sup>b</sup> Department of Physics, Korea University, Jochiwon, Korea

Received 18 August 2003

## 다채널 스쿼드 미분계에서 센서 잡음이 위치추정 오차에 미치는 영향

김기웅<sup>\*,a</sup>, 이용호<sup>a</sup>, 권혁찬<sup>a</sup>, 김진목<sup>a</sup>, 정용석<sup>a</sup>, 강찬석<sup>a,b</sup>, 김인선<sup>a</sup>, 박용기<sup>a</sup>,  
이순걸<sup>b</sup>

### Abstract

We analyzed a noise-sensitivity profile of a specific SQUID sensor system for the localization of brain activity. The location of a neuromagnetic current source is estimated from the recording of spatially distributed SQUID sensors. According to the specific arrangement of the sensors, each site in the source space has different sensitivity, that is, the difference in the lead field vectors. Conversely, channel noises on each sensor will give a different amount of the estimation error to each of the source sites. e.g., a distant source site from the sensor system has a small lead-field vector in magnitude and low sensitivity. However, when we solve the inverse problem from the recorded sensor data, we use the inverse of the lead-field vector that is rather large, which results in an overestimated noise power on the site. Especially, the spatial sensitivity profile of a gradiometer system measuring tangential fields is much more complex than a radial magnetometer system. This is one of the causes to make the solutions of inverse problems unstable on intervening of the sensor noise. In this study, in order to improve the localization accuracy, we calculated the noise-sensitivity profile of our 40-channel planar SQUID gradiometer system, and applied it as a normalization weight factor to the source localization using synthetic aperture magnetometry.

*Keywords* : magnetoencephalography (MEG), superconducting quantum interference device (SQUID), synthetic aperture magnetometry (SAM), inverse problem, neuromagnetic source localization

### I. 서론

스쿼드 센서 기술의 발전은 인체 내의 신경

진류가 생성하는 미약한 자기장의 측정을 가능하게 하였다. 뇌자도 (magnetoencephalogram; MEG) 및 심자도 (magnetocardiogram; MCG)는 다채널 스쿼드 센서 시스템을 이용한 대표적인 생체자기 측정 분야이다 [1]. 특히, 뇌기능의 연구에 있어서 뇌자도는 여러 다른 수단들에

<sup>\*</sup>Corresponding author. Fax : +82 42 868 5290  
e-mail : kwkim@kriss.re.kr

비해 밀리초에 달하는 높은 시간분해능을 장점으로 한다 [2]. 또한, 다채널 센서 시스템의 개발은 뇌자도의 공간분해능 역시 밀리미터 수준으로 높임으로써, 신경전류에 기반한 뇌기능의 위치추정 연구를 본격적으로 가능하게 하였다.

뇌자도 장치의 공간 분해능은 센서의 배치 및 미분계 구성, 전류원 제약조건 (뇌 모델), 센서 잡음, 그리고 전류원의 센서 시스템에 대한 상대적 위치의 영향을 받는다. 일반적으로 공간분해능에 대한 연구에 관해서는 몬테카를로 방법과 같이 가상적으로 주어진 신호를 역문제로 풀어서 구한 추정위치로부터 통계적으로 구하거나, 등가적인 공식 [3]에 의해 계산량을 줄여서 구하는 방법들이 보고되었다. 두 방법 모두 역문제를 풀어내야 하므로, 삼차원 공간 전체의 각각의 포인트에 대해서 통계적으로 분석하는 데, 그 계산량이 방대해지는 어려움이 있으므로, 단순히 가상 전류 쌍극자의 깊이 에 따른 분해능의 저하를 구하는 정도로 국한되었다.

본 논문에서는 40채널 접선성분 측정방식의 평면형 미분계 시스템 [4]에서, 센서 잡음이 유발할 수 있는 잡음 전력의 공간적 분포를 가시화하여, 신뢰 측정 범위를 고려하였다. 특히, 일반적으로 사용되는 법선성분 측정에 비해서, 접선성분 측정방식은 뇌 도체에 의해 생성되는 체적전류의 영향을 많이 받을 것이 예상되므로, 잡음 전력의 공간분포를 계산해 볼 필요가 있다. 잡음 전력의 계산은 주로 레이더 기술에서 응용되고 있는 적응 빔 형성법의 일종인 synthetic aperture magnetometry (SAM)를 사용함으로써, 분석에서의 역문제 해법의 필요를 제거하였고 [5], SAM은 시공간 방법이므로, 일정 시간동안의 센서잡음을 모두 고려할 수 있으므로, 기존 방법에서의 통계적 시도의 횟수를 줄일 수 있다. 잡음 전력의 영상화는 자유공간에서의 전류쌍극자, 자기쌍극자, 그리고 구형 도체 모델에서의 전류쌍극자의 세가지 경계 모델에 대해서 적용하였다. 또한, 추정한 잡음 전력으로 신호 전력을 정규화 함으로써 접선 성분 측정 방식에 있어서도 SAM에 의한 전류원 위치추정이 가능함을 보였다.

## II. 40채널 접선성분 측정 스쿼드 미분계

40채널 뇌자도 측정시스템은 double relaxation oscillation SQUID (DROS) 방식의 스쿼드 센서를 사용하고, 기관 위에 스쿼드 센서와 픽업코일 (선폭 0.5 mm, 외변의 크기가 12 mm × 12 mm인 두 개의 정사각형 코일이 40 mm 간격을 두고 직렬 연결)이 집적된 센서 40개로 이루어져 있다. 뇌자도 측정시 머리표면에 수직한 방향을 z 방향이라고 할 때 설계된 미분계는 접선 (tangential) 성분인  $dB_x/dz$ 와  $dB_y/dz$ 값을 동시에 각각 20 (5×4) 채널씩 측정하도록 배치되었다 (Fig. 1). 접선성분의 자장을 측정할 경우 자장 신호의 피크가 전류쌍극자 바로 위에 존재하므로 자장분포를 얻는데 필요한 측정면적이 법선 (radial) 성분을 측정할 경우보다 작아도 되며, 접선성분의 경우 신경세포 내 일차전류뿐만 아니라 신경세포 외의 체적전류로부터의 정보도 동시에 측정하므로 다수 전류원 추정 시 유리한 장점을 가지는 반면에, 역으로 측정 센서에 잡음이 있는 경우, 전류원을 찾을 때, 체적 전류 영향을 결정하는 파라미터까지 고려되므로, 복잡한 잡음 전력 분포 및 위치 추정 오차가 예상된다. 본 논문에서는 모든 센서가 독립적으로 5 fT<sub>rms</sub>의 gaussian 잡음을 갖는다고 가정하고 잡음 전력의 분포를 계산 하였다.

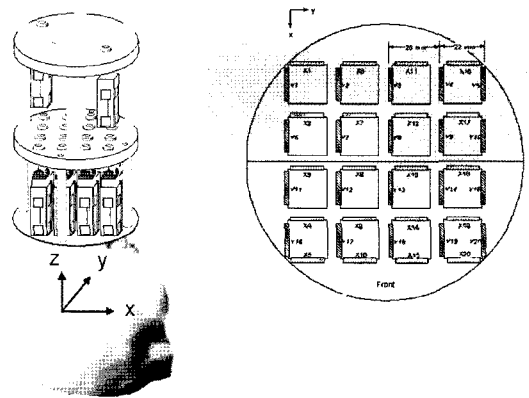


Fig. 1. SQUID sensor arrangement of the 40-channel planar SQUID gradiometer system.

### III. Synthetic Aperture Magnetometry (SAM)

SAM은 머리의 특정 공간 좌표에서의 전류원 전력을 추정하기 위해서 제약 최소분산 빔형성법 [6]을 사용한다. 즉, 관심있는 영역을 공간적으로 정하고, 그 영역 내부 voxel들에서의 전류원 전력을 추정하여 gray-scale 값 등으로 표시함으로써, 뇌 내부의 생체전기활동을 영상화하는 것이다. SAM의 기본적인 원리는 특정 위치에서의 전류원 전력을 추정하기 위해, 다른 위치, 다른 방향에서의 전류원 전력이 주는 영향을 최소화하는 것이다.

매체가 선형적이라고 가정하면,  $M$ -채널 센서로 측정되는  $M$ -요소를 갖는 신호 크기 벡터  $\mathbf{x}$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N \mathbf{L}(\mathbf{q}_i) \mathbf{m}(\mathbf{q}_i) + \mathbf{n}, \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 전류원의 개수이고,  $\mathbf{L}(\mathbf{q})$ 와  $\mathbf{m}(\mathbf{q})$ 는 각각 위치  $\mathbf{q}$ 에서의 도출장(lead-field) 벡터와 쌍극자모멘트를 나타내고,  $\mathbf{n}$ 은 채널 잡음으로서 각 센서 채널의 잡음에 상관성이 없고, 정규분포한다고 가정하면  $\mathbf{n} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{\Sigma})$ 이고,  $\mathbf{\Sigma}$ 는 대각행렬이된다.

일반적인 적응빔형성법의 경우는 고주파 수신 안테나 어레이에 적용될 때, 신호의 크기와 위상을 모두 고려해야 하지만, 뇌자도 신호는 극저주파이므로, 센서간 거리는 뇌자도 신호의 파장에 비해 무시할 만큼 작아서, 위상은 무시하고 크기 정보만을 고려하는 것으로 충분하다. 위치  $\mathbf{q}$  (위치 및 방향 정보를 모두 갖는 벡터)에서 추정 전류원의 크기를  $S(\mathbf{q})$ 라고 하면,  $S(\mathbf{q})$ 는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(\mathbf{q}) = \mathbf{H}(\mathbf{q})^T \mathbf{x}, \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 는  $M$  개의 성분을 갖는 위치  $\mathbf{q}$ 로의 빔형성계수 벡터이고, 윗첨자  $T$ 는 전치행렬을 나타낸다. 목표위치의 전류원 외의 다른 방향에서의 영향을 최소화하기 위해서, 일정 기간동안의 전력  $S^2(\mathbf{q})$ 을 최소화하는 조건으로 빔형성계수  $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 를 결정한다. 다시말해서 아래의 식이 최소값을 갖는  $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 를 구한다.

$$S^2(\mathbf{q}) = [\mathbf{H}(\mathbf{q})^T \mathbf{x}]^T [\mathbf{H}(\mathbf{q})^T \mathbf{x}] \approx \mathbf{H}(\mathbf{q})^T \mathbf{C} \mathbf{H}(\mathbf{q}), \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{C}$ 는 일정기간동안의 측정값으로부터 추정된 공분산행렬로서,  $\mathbf{C} = E[(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T]$ 이다. 여기서  $\bar{\mathbf{x}}$ 는 일정기간동안의 측정 평균값이다. 전력 최소화 과정 중에 제약 조건  $\mathbf{H}(\mathbf{q}_i)^T \mathbf{L}(\mathbf{q}_j) = \delta(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j)$ 를 고려함으로써 특정 위치의 전류원만 고려하게 되고, 센서와 전류원 사이의 거리에 관계없도록 영향력의 크기를 정규화할 수 있다. 라그랑지에 승수를 이용하여 제약조건 하에서의 문제를 풀면, 약간의 계산 뒤에 다음의 조건에서 신호원 전력이 최소가 됨을 알 수 있다.

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = \frac{[\mathbf{C} + \mu \mathbf{\Sigma}]^{-1} \mathbf{L}(\mathbf{q})}{\mathbf{L}(\mathbf{q})^T [\mathbf{C} + \mu \mathbf{\Sigma}]^{-1} \mathbf{L}(\mathbf{q})}, \quad (4)$$

여기서,  $\mu$ 는 상관성이 없는 채널 잡음의 상한선을 지정해주는 정규화 매개변수로서, 공간선택성(공간해상도)과 잡음 크기간의 타협에 관계한다. 즉,  $\mu$ 의 값이 음으로 커질수록 잡음영향은 작아지지만 결과는 공간저역통과필터링을 적용한 것처럼 공간 해상도가 저하된다. 이 논문에서 잡음분산행렬  $\mathbf{\Sigma}$ 은  $\mathbf{C}$ 의 최소 특이치에 해당하는 기저를 채널 잡음으로 가정하고 추정하였다. 또한,  $\mathbf{q}$ 에서의 방향성분은 각 추정점에서의 최대전력을 주는 방향으로 결정하였다. 구체적으로는 잡음공간을  $\mathbf{C}_N$ 이라고 했을 때,

$\mathbf{L}(\mathbf{q}_{opt\_dir})^T \mathbf{C}_N = 0$ 을 만족함으로써, 잡음공간과 직교하는 도출장을 주는 방향으로 결정하였다. 결론적으로 추정된 전류원 전력은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S^2(\mathbf{q}) = (\mathbf{L}(\mathbf{q})^T [\mathbf{C} + \mu \mathbf{\Sigma}]^{-1} \mathbf{L}(\mathbf{q}))^{-1}. \quad (5)$$

### IV. 자기장 경계 모델

본 논문에서는 세가지 경계모델에 대해서 40 채널 스쿼드 시스템의 잡음 전력을 구한다. 기본적으로 전류원이 점원(point-source)이라고 가정하면, 거리가 멀어짐에 따라서 도출장의

크기가 거리의 제곱 이상에 반비례하여 감소한다. 센서 측정값으로부터 전류원을 계산하는 것은 도출장의 역행렬을 구하는 것으로, 센서 잡음이 유한할 때, 센서로부터 멀리 떨어진 위치에서의 잡음 전력은 매우 큰 추정값을 가지게 된다. 자유 공간에서는 이 영향이 가장 커지게 된다.

자유공간상의 전류쌍극자와 자기쌍극자의 두 가지 경우에 대해서는 각각 다음의 식들에 의해 도출장을 계산할 수 있다.

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) \propto \mathbf{Q}(\mathbf{r}_0) \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^3}, \quad (6)$$

여기서  $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ 은 위치  $\mathbf{r}$ 에서의 자기장,  $\mathbf{Q}(\mathbf{r}_0)$ 는 위치  $\mathbf{r}_0$ 에서의 전류쌍극자 모멘트로서 식은 일반적인 비오-사바르의 법칙을 나타내고 있다.

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) \propto \frac{-\mathbf{m}(\mathbf{r}_0)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^3} + \frac{3(\mathbf{m}(\mathbf{r}_0) \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0))(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^5}, \quad (7)$$

여기서  $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ 은 위치  $\mathbf{r}$ 에서의 자기장,  $\mathbf{m}(\mathbf{r}_0)$ 는 위치  $\mathbf{r}_0$ 에서의 자기쌍극자 모멘트로서, 이 식은 폐장 속의 미세자석이 형성하는 자기장의 계산 등에 유용하다.

마지막으로 보통 두개골의 구형근사에서 사용되는 모델인 구대칭 도체에서 전류쌍극자가 위치할 때, 체적전류까지 고려한 외부에서의 자기장은 아래의 식으로 구할 수 있다 [3].

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) \propto \frac{F\mathbf{Q} \times \mathbf{r}_0 - \mathbf{Q} \times \mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{r} \nabla F}{F^2}, \quad (8)$$

여기서  $F = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|(|\mathbf{r}| |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0| + |\mathbf{r}|^2 - \mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_0)$ 이다.

## V. 전산모사 결과

세 가지 경계조건에 대해서 센서 하단 픽업 코일 중심으로부터 30 mm 밑의 (가로 300 mm), 세로 300 mm, 깊이 120 mm) 공간 상의 잡음전력을 2 mm 간격으로 SAM 방법에 의해 추정하였다. 구형도체 모델의 경우, 좌표의 원점을 센

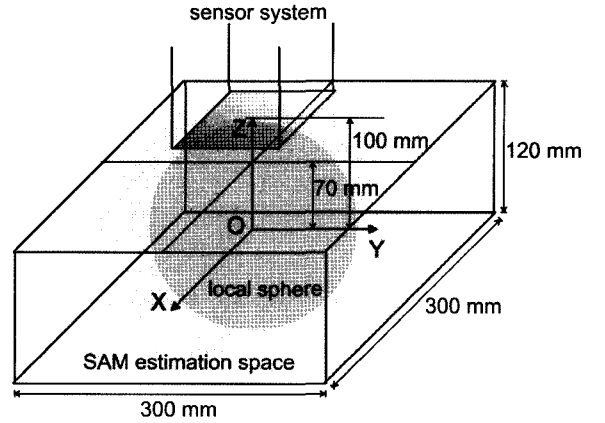


Fig. 2. The range of SAM estimation and the coordinates.

서하단 픽업코일의 중심으로부터 100 mm 아래에 두었다 (Fig. 2).

Fig. 3에 잡음전력분포를 보였다. Fig. 3(a)와 3(b)는 각각 자유공간에서의 전류쌍극자 추정을 하였을 때의 x-y 평면상 ( $z=0$ ), x-z 평면상 ( $y=0$ )에서의 잡음전력분포이다. Fig. 3(c)와 3(d)는 자유공간에서의 자기쌍극자추정을 한 결과이고, Fig. 3(e)와 3(f)는 구의 중심을 좌표계의 원점에 둔 도체 구 내부의 전류쌍극자를 추정한 결과이다. Fig. 3(g)와 3(h)는 각각 원점 근방에서 생기는 극점의 영향으로 Fig. 3(e)와 3(f)에서 축소되어 보이는 영역을 확대해서 보여준다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 자유공간에서는 체적 전류의 영향이 없으므로, 잡음전력은 센서시스템에서 멀어질수록 비교적 균일한 증가를 보인다; x-y 평면상에서는 Fig. 3(a), 3(c)에서 보이는 바와 같이 센서 중앙에서 잡음전력이 낮고 주변으로 갈수록 높아지며, x-z 평면상에서는 Fig. 3(b), 3(d)에서 보이는 바와 같이 센서에서 멀리, 깊은 위치로 갈수록 잡음전력이 증가함을 관찰할 수 있다. Fig. 3(b)와 3(d)를 비교해보면, 얕은 위치에서는 자기쌍극자가 전류쌍극자보다 넓은 영역에서 평탄한 잡음전력을 보이는 반면에, 깊이가 깊어질수록 잡음 전력의 증가가 더 가파름을 볼 수 있다. 그 이유는 도출장의 크기가 전류쌍극자의 경우 거리의 2승에 반비례하는 반면에, 자기쌍극자의 경우 거리의 3승 반비례해서 감소하기 때문이다. 도체 구 모델에서는 Fig. 3(e)-3(h)에서 보이는 바와 같이, 불균일한 잡음전력 및 특이점 분포를 갖

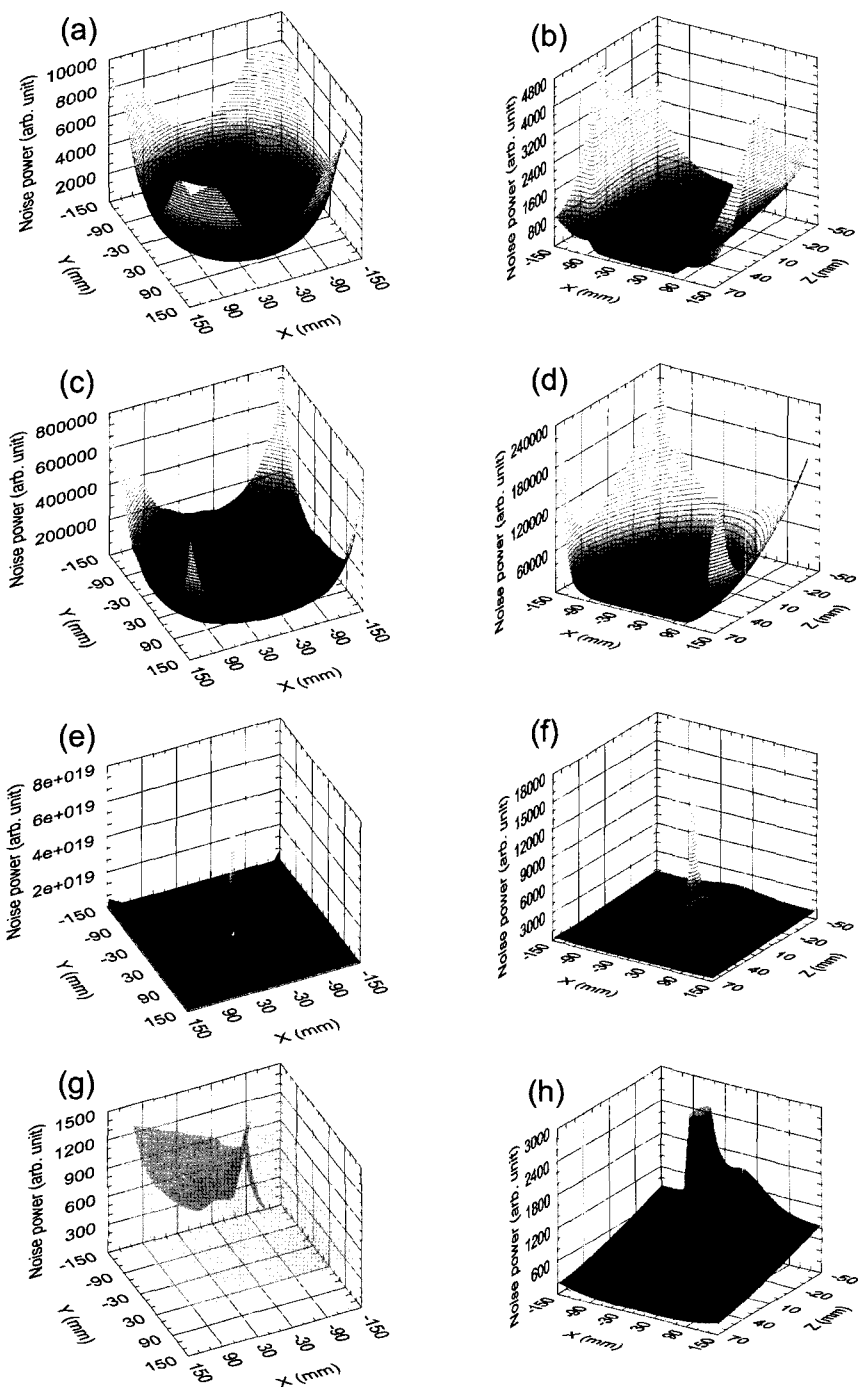


Fig. 3. Three-dimensional noise power distribution for the 40-ch. gradiometer system. The noise power has been estimated by SAM. The left column and the right column are the power distribution on the x-y plane ( $z=0$ ) and on the x-z plane ( $y=0$ ), respectively. (a) and (b) are for the case of a current dipole in free space. (c) and (d) are for the case of a magnetic dipole in free space. (e)-(h) are for the case of a current dipole in a spherically symmetric conductor. (e)-(h) show an irregular noise peaks, which results from the volume current consideration in the tangential component measurement

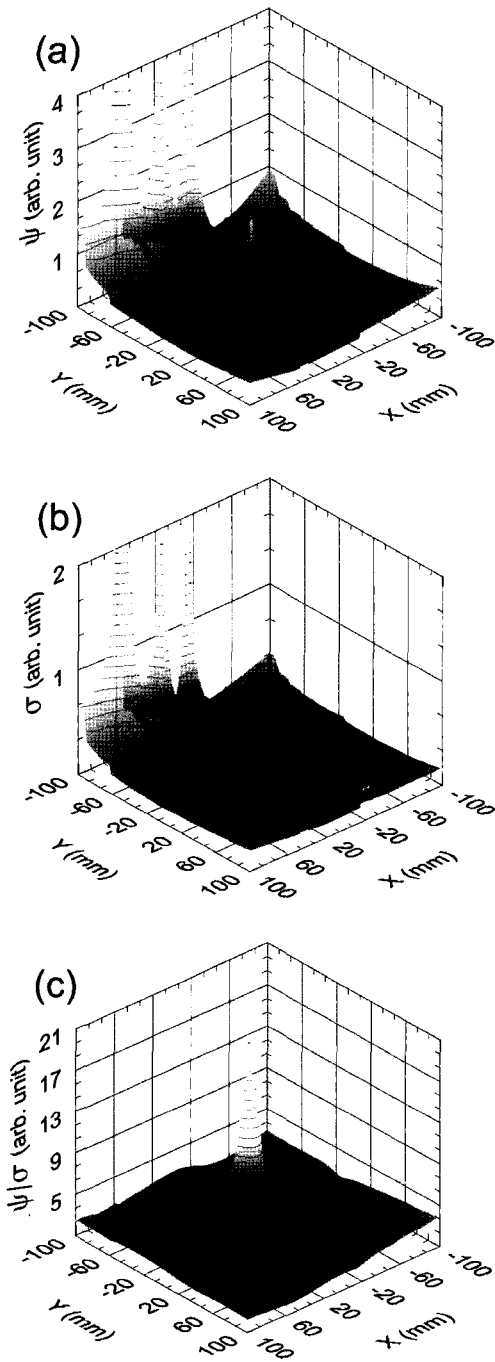


Fig. 4. SAM estimation for a current dipole source in a spherical phantom. (a) shows the signal power distribution, (b) shows the noise power distribution, and (c) shows the normalized signal power distribution. Note that (c) indicates the position of the dipole source with a sharply-determined maximum point.

는다. 이것은 전류원 자체의 영향 외에도 전류원에 의해 형성되는 도체 내부의 체적전류 역시 센서에 도출장을 생성하기 때문이다. 구형 근사의 경우에도, 외부에서 측정할 자기장의 법선성분은 체적전류의 영향을 받지 않지만, 접선성분은 여전히 체적전류의 영향을 받는다 [3]. 우리의 센서 시스템이 자기장의 접선성분을 측정하는 구조이므로, 센서 측정값에는 체적전류의 기여가 존재한다. 따라서, 센서의 잡음으로부터 잡음원을 역으로 추정할 경우, 잡음원의 위치 파라미터 뿐만 아니라 체적전류를 결정하는 파라미터까지 결정되어야 한다. 결정할 파라미터가 많은 경우 가능한 해의 집합은 더 커지게 되고, 이 결과 잡음전력이 증가하게 된다. 그림에서 구의 원점에 발생한 극값도, 원점에서의 대칭성에 기인한 해집합의 증가로 이해할 수 있다. Fig. 3(h)를 보면 중심부분이 주변 부분 보다 잡음전력이 높는데, 이로부터 구형 도체모델에서는 센서와 잡음원의 거리에 의해 결정되는 잡음전력의 분포보다 체적전류에 의한 해의 불확실성에 기인한 잡음전력의 분포가 우선하는 영역이 있음을 알 수 있다.

실제 측정에 있어서의 센서잡음 특성은 각 센서마다 다르므로, 잡음전력의 분포는 더욱 복잡한 양상으로 나타날 뿐만 아니라, 접선성분 측정의 경우에는 체적전류 결정 파라미터까지 잡음전력에 영향을 준다. 불균일하고 크기가 큰 잡음전력은 신호전력의 추정에 어려움을 준다.

우리는 접선성분 측정방식의 센서시스템에서의 신호전력의 추정을 위해서, 신호전력의 분포를 잡음전력 분포로 정규화하는 방법을 사용하였다. 다시말해서, 측정신호로부터 특이치분해 등의 방법으로 센서 서로간에 상관성이 없는 성분을 잡음으로 규정하여, SAM으로 잡음전력분포  $\sigma(\mathbf{q})$  를 추정하고, 측정신호로부터 SAM에 의해 신호전력분포  $\psi(\mathbf{q})$  를 추정한 뒤, 신호원의 위치는 정규화신호전력분포  $\psi(\mathbf{q})/\sigma(\mathbf{q})$  로써 표시하였다.

## VI. 실험 결과

Fig. 4는 반경 99 mm의 소금물을 가득 채운

플라스틱 구 내부에 길이 10 mm의 전류쌍극자를 갖는 두개형 팬텀에 교류 전류를 흘려주고, 40채널 스쿼드 센서 시스템으로 자기 차폐실에서 자기장을 측정하여, SAM으로 신호원 추정을 한 그림이다. 인가 신호는 주파수 13 Hz, 크기는 가장 크게 측정된 센서에서 약 500 fT<sub>p,p</sub>의 교류이고, 발생한 자기장을 40 채널 센서 시스템에서 두 개의 불량센서(x17, y6)를 제외한 19개의 x방향, 19개의 y방향, 총 38개의 센서로써 1 초간 256 Hz의 샘플링으로 측정한 데이터를 사용하였다.

Fig. 4(a)는 SAM으로 추정된 신호전력분포  $\psi(\mathbf{q})$ 이고, Fig. 4(b)는 잡음전력분포  $\sigma(\mathbf{q})$ 이다. 이로부터 중심에 위치한 신호 전류쌍극자의 신호전력보다 센서잡음에 의해 생성된 잡음전력이 훨씬 큰 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(c)에 정규화신호전력분포  $\psi(\mathbf{q})/\sigma(\mathbf{q})$ 를 보였다. 센서잡음에 의한 잡음전력 성분들이 정규화 과정에서 사라지고, 신호원의 위치만이 정확히 결정되었다.

## VII. 결론

SAM 추정을 통해서 40채널 접선성분 측정 방식의 스쿼드 미분계에서 센서의 잡음이 유발할 수 있는 위치추정 오차요인을 삼차원 공간상에 잡음전력으로써 표시하였다. 자유공간 상에서의 전류쌍극자나 자기쌍극자의 경우에는 단순히 도출장의 크기에 반비례하여 잡음전력이 증가하였으나, 도체 모델의 경우에는, 접선성분 측정 방식 시스템의 특성상, 체적전류의 기여에 의한 불균일하고 국부적으로 극값을 갖는 잡음전력 분포를 보였다.

또한, 실제 구형의 도체 팬텀에서의 실험을 통해서 접선성분 측정방식의 스쿼드 센서 시스템에서도 신호전력을 잡음전력으로 정규화 함

으로써 SAM 추정에 의한 전류원의 위치추정이 가능함을 검증하였다.

SAM을 통한 전류원의 위치추정은 측정신호를 시공간 분석에 기반하여 분리 표시하므로, 자발 뇌파의 활동영역 연구 및 간질 연구 등에 유용하게 활용 될 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구소(뇌차도 원천기술 개발)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] J. Vrba, "Multichannel SQUID biomagnetic systems", in Applications of superconductivity, eds. H. Weinstock, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 61-138 (2000).
- [2] M. Hamalainen, R. Hari, R. J. Ilmoniemi, J. Knuutila and O. V. Lounasmaa, "Magnetoencephalography - theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain", Rev. Mod. Phys. **65**(2), 413-497 (1993).
- [3] J. Sarvas, "Basic mathematical and electromagnetic concepts of the biomagnetic inverse problem", Phys. Med. Biol. **32**(1), 11-22 (1987).
- [4] Y. H. Lee, H. Kwon, J. M. Kim, and Y. K. Park, "Multichannel applications of double relaxation oscillation SQUIDs", Supercond. Sci. Technol. **14**, 1022-1026 (2001).
- [5] S. E. Robinson and J. Vrba, Proc. 11-th Int. Conf. on Biomagnetism (Biomag98), 302-305 (1998).
- [6] B. Widrow and S. D. Stearns, "Beamformers with superresolution: Adaptive Signal Processing", Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc. 445-455 (1985).