

Simulation of Signal Amplitudes and Signal-to-noise Ratios of 1st order and 2nd order Gradiometers with Various Baselines

C. S. Kang^{*,a,b}, K. K. Yu^b, Y. H. Lee^b, H. Kwon^b, J. M. Kim^b, Y. K. Park^b, S. G. Lee^a

^a Korea University, Jochiwon, Chungnam, Korea

^b Bio-signal Research center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

Received 12 August 2007

다양한 기저선을 갖는 1차 및 2차 미분계의 신호크기 및 신호 대 잡음비 조사

강찬석^{*,a,b}, 유권규^b, 이용호^{+,b}, 권혁찬^b, 김진목^b, 박용기^b, 이순걸^a

Abstract

We investigated signal-to-noise ratios (SNRs) of magnetocardiography (MCG) signals using the first-order and the second-order gradiometers of different baselines. The MCG signals were recorded using a measurement system with 61 magnetometers which measured the normal magnetic component to the chest surface. The distance between the chest surface and the bottom of the dewar was changed from 0 cm to 15 cm, and the MCGs were measured for each distance. By subtracting the other signals (distance = 1 to 15 cm) from the reference signal (distance = 0 cm), we could simulate the first-order and the second-order gradiometer signals with various baselines. In addition, to evaluate the reproducibility of the simulation, we fabricated the wire wound first-order and second-order gradiometers which measured a normal magnetic component to the chest surface. The baselines of the first-order gradiometers were, respectively, 50 mm, 70 mm and 100 mm and the baseline of the second-order gradiometer was 50 mm. Using these gradiometers, we recorded the MCG signal and compared the SNR between the simulation and the measurement.

Keywords : Signal-to-noise ratio, Baseline, Gradiometer, SQUID.

I. 서 론

사람의 심장에서 발생하는 자장신호인 심자

도 신호는 그 크기가 10 pT 내외인 매우 미약한 신호이기 때문에 우리 주변에 존재하는 무수한 환경자기잡음에 의한 영향을 받는다. 이러한 환경자기잡음은 자기차폐실(Magnetically Shielded Room)을 이용하여 많은 부분 제거해 줄 수 있으나 부가적으로 미분계를 이용할 경

*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5291
e-mail : yhlee@kriss.re.kr
+On leave from KRISS

우 환경 자기잡음을 더욱 효과적으로 제거할 수 있게 된다. 미분계는 면적이 같은 코일을 반대 방향으로 감아 자장신호의 “차”를 측정하는 방식으로서 센서로부터 수 cm 거리에서 발생하는 심자도 신호에 비해 매우 먼 거리에서 균일하게 들어오는 잡음 신호를 제거할 수 있게 된다. 이러한 미분계의 잡음제거 특성은 감긴 코일 사이의 거리인 기저선(baseline)에 의해 결정되는데, 즉 기저선이 너무 짧을 경우 감겨진 각각의 코일들에서 측정되는 측정값들(신호 및 잡음)의 연관성이 크기 때문에 잡음과 함께 신호까지 같이 감소하게 되는 단점이 있으며, 또한 기전선의 길이가 너무 길 경우에는 각각의 코일들에서 측정되는 잡음들 간의 연관성이 감소하기 때문에 잡음제거효율이 떨어지게 된다[1]. 그러므로 측정하고자 하는 신호의 크기와 측정이 이루어지는 잡음환경에 대하여 최적의 신호 대 잡음비를 갖도록 적절한 기저선의 길이를 결정해야 한다 [2].

본 연구에서는 최적의 미분계 특성을 나타내는 기저선을 조사하기 위하여 자력계 시스템을 이용하여 단일 다이폴과 직선도선 의한 이상적인 신호와 실제 심자도 신호를 측정하고 이로부터 다양한 기전선을 갖는 1차 및 2차 미분신호를 전산시능 함으로써 기저선에 따른 미분계의 출력신호 감소율 및 신호 대 잡음비를 조사하였다. 또한 전산시능의 결과를 확인하기 위하여 기저선이 5, 7, 10 cm인 1차 미분계, 그리고 기저선 5 cm인 2차 미분계를 소수 제작하여 실제 심자도 신호를 측정함으로써 위의 전산시능 결과와 비교하였다.

II. 실험 방법

1. 자력계 시스템

측정에 사용된 자력계는 DROS(Double Relaxation Oscillation SQUID) 방식을 적용한 센서로서 기존의 DC-SQUID 방식에 비해 약 10 배 정도 큰 자속-전압 변환계수를 나타내기 때문에 상온의 전단중폭기로 이루어진 간단한 전

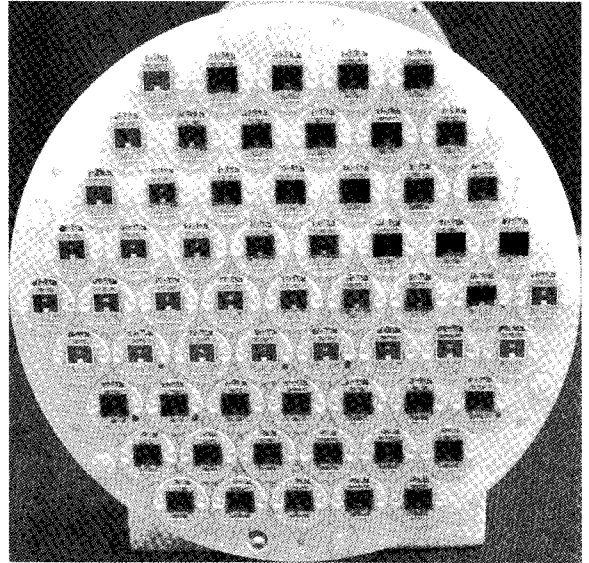


Fig. 1. Sensor configuration of the DROS magnetometer.

자회로도도 SQUID의 출력신호를 직접검출 할 수 있게 되어 심자도와 같이 매우 크기가 작은 자장 신호를 검출하기에 적합한 방식의 센서이다[3]. 제작된 DROS 자력계는 자기차폐 공간에서 평균 $4\sim 6 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 100 \text{ Hz}$ 의 감도를 가진다. 인서트에는 61개의 DROS 자력계가 원형 sensor plate에 육각형 모양으로 배치된 구조이며 지름이 약 208 mm인 원형 범위를 그 측정영역으로 갖는다 [4]. 배치된 모든 센서들은 가슴표면에 수직한 성분을 측정한다. 이 인서트를 액체헬륨이든 비자성 FRP(Fiber Reinforced plastics) 듀아에 넣고 자기차폐실 내부에서 동작시킨다. 측정 시 hardware 0.3 Hz 고역통과 필터 및 100 Hz 저역 통과 필터 그리고 60 Hz notch 필터를 사용하였다. 그림 1은 제작된 61개의 DROS 자력계가 배치된 모습이다.

2. 미분신호의 전산시능

미분신호를 재구성 하기 위해 자력계 시스템을 이용하여 신호원에서 자력계 시스템의 듀아 외부바닥 사이의 거리를 0 cm부터 15 cm까지 변화시켜 가며 자장신호를 측정하였다. 1차 미분계는 같은 면적의 두 코일을 반대방향으로 감는 방식이므로 간격 0 cm에서 측정된 값과

거리 1 ~ 15 cm에서 측정된 값들을 각각 빼줌으로써 기저선이 최소 1 cm에서 최대 15 cm인 미분신호를 만들어 줄 수 있다. 반면 2차 미분계는 그 감는 횟수가 각각 1, 2, 1회인 세 코일이 균일한 간격으로 직렬 연결되는 방식이며 1회 감긴 두 코일과 2회 감긴 코일의 극성이 각각 서로 반대이다. 그러므로 2차 미분신호를 전산 시뮬 하기 위하여 위치 0 cm에서의 신호와 이 0 cm으로 부터 거리 X cm와 2 X cm 만큼 떨어진 위치를 가정하면, "0"과 "2X"에서 각각 측정된 신호를 더한 후 "X" 위치에서 측정된 신호의 2배를 한 값과 빼주면 된다. 자력계를 이용하여 각 위치에서 측정된 모든 신호들은 미분신호를 전산시뮬 하기 전에 시간평균 되었다.

전산 시뮬된 1차 및 2차 미분 신호로부터 기저선 변화에 따른 미분계 출력신호의 크기 감소율과 신호 대 잡음비 변화를 조사 하였다. 미분계의 출력신호 변화는 전산 시뮬된 미분신호들 중 가장 신호가 큰 채널에서의 신호와 전 채널 평균신호의 변화를 조사하였다. 이러한 전산시뮬을 통해 여러 기저선에 따른 신호크기 감소율 및 신호 대 잡음비를 조사하였다. 신호는 R-peak의 크기로 정의하였으며 전 채널 중 가장 큰 신호와 각 채널의 최대신호를 전 채널에 대해 평균한 두 경우를 고려하였다. 또한 P와 Q 사이의 구간을 잡음 구간으로 하여 각 채널 내 이 구간의 평균값들을 구한 뒤 전 채널에 대해 제곱평균을 한 값을 잡음으로 정의하였다. 단 이상적인 경우에서는 기저선에 따른 신호의 크기 감소율만을 구했는데, 이 경우 신호는 단일 다이폴과 직전도선에 사인파를 인가하여주었을 때 측정된 자장신호의 진폭(peak-to-peak)의 평균값을 신호크기로 정의하였다.

III. 결과 및 토의

그림 2의 (a)는 거리변화에 따른 자장신호의 크기 감소율을 나타내는데, 그래프를 fitting 한 결과 신호원으로부터 측정위치 사이의 거리 R

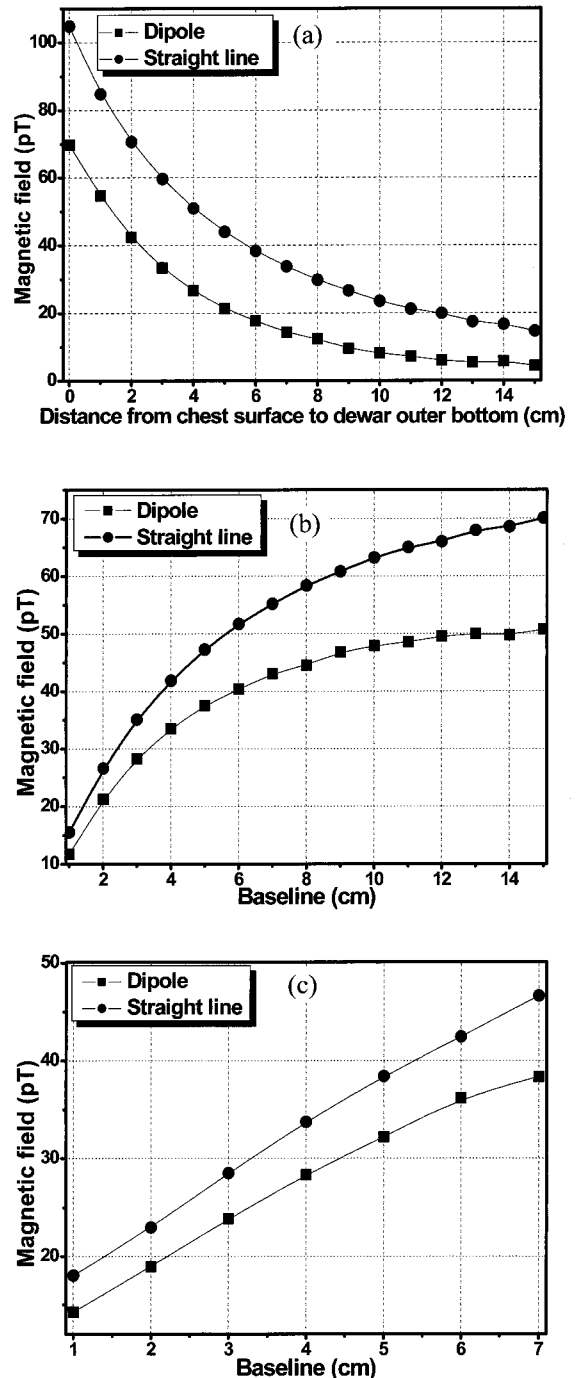


Fig. 2. (a) signal amplitude decrease pattern for varying distance from chest surface to dewar outer bottom, simulated amplitude of (b) 1st-order gradiometer and (c) 2nd-order gradiometer with various baselines.

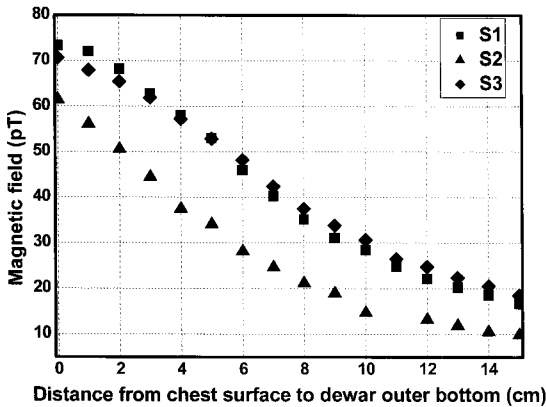


Fig. 3. The MCG signal amplitude decrease pattern for varying distance from chest surface to dewar outer bottom.

에 대해 다이폴과 직선도선이 각각 $1/R^{2.22}$ 와 $1/R^{1.75}$ 비례하는 것으로 나타났다. 그림 2의 (b)와 (c)는 1차 및 2차 미분계 신호로 전산시뮬했을 때 기저선에 따른 신호크기 변화를 보여준다. 1차 미분계의 경우 기저선이 10 cm 이상에서 신호의 크기 감소율이 최소로 수렴하는 것으로 나타나는데 일반적으로 신호에 비해 잡음의 공간적 균일성이 크기 때문에 이렇게 신호크기 감소율이 작은 구간일수록 신호의 손실 없이 잡음을 제거할 수 있으므로 미분계의 신호 대 잡음비가 우수하다고 할 수 있다.

또한 2차 미분계의 경우는 그래프에서 보듯이 수렴구간이 나타나지 않는 것으로 보아 최적의 신호 대 잡음비를 갖기 위해서는 기저선이 조금 더 길어야 할 것으로 보인다. 그림 3은 거리변화에 따른 자장신호의 크기 감소율을 사람의 심장을 신호원으로 하여 조사한 결과를 보여준다. 3명의 정상인에 대하여 측정하였고 절대값이 다르기는 하나 비교적 비슷한 추이로 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 4는 거리 별로 측정된 심자도 신호를 바탕으로 기저선에 따라 1차 및 2차 미분계 신호로 전산시뮬한 신호크기 변화와 실제 제작된 미분계로 측정된 심자도 신호의 크기를 비교한 결과를 보여준다. 제작된 미분계는 기저선이 각각 50, 70, 100 mm인 1차 미분계와 기저선이 50 mm인 2차 미분계이며 각 3개씩 제작하여 측정에

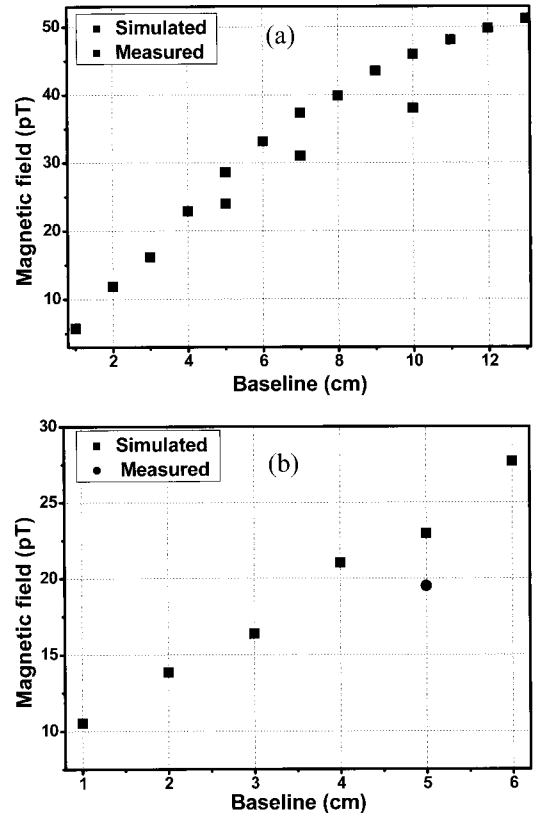


Fig 4. Simulated and measured signal amplitude of (a) 1st-order gradiometer and (b) 2nd-order gradiometer.

활용하였다. 전산 시뮬된 미분신호의 신호크기와 실제 제작된 센서로 측정된 미분신호의 신호크기 사이에 평균 약 8%의 크기 오차가 있었다. 이는 측정시간 및 환경의 차이, 신호원에 대한 센서들의 위치의 차이 등 여러 오차 요인들을 감안할 때 그다지 큰 차이라 할 수 없겠다. 또한 제작된 미분계의 출력신호가 자력계 출력신호와 비교하여 얼마만큼 감소하는지를 확인하기 위하여, 자력계를 동시에 측정에 이용하였다. 신호의 크기는 앞서의 경우와 마찬가지로 R-peak의 크기로 정의 하였다. 표 1은 자력계 신호(S_M) 대비 미분계의 출력신호 크기(S_G)를 전산 시뮬된 결과와 실제 제작된 미분계의 경우에 대해 보여준다. 두 경우에서 평균 3.4%의 오차율을 보였는데, 이로부터 자력계를 이용한 미분계로의 전산시뮬이 기저선에 따

른 미분계의 특성을 평가하기에 충분한 정확성을 가짐을 확인할 수 있다.

Table 1. The signal amplitude ratio of the gradiometer to the magnetometer when measured and simulated.

Pickup coil type	Simulated		Measured	
	S_G	S_G/S_M	S_G	S_G/S_M
2 nd -order gradiometer	23 pT	37.3%	20 pT	42.5%
1 st -order gradiometer (50 mm)	29 pT	45.5%	24 pT	51.1%
1 st -order gradiometer (70 mm)	40 pT	62.8%	30 pT	63.8%
1 st -order gradiometer (100 mm)	50 pT	78.9%	38 pT	80.1%
Magnetometer	64 pT	100%	47 pT	100%

IV. 결 론

본 연구에서는 기저선에 따른 미분계의 특성을 조사하기 위한 방법으로, 자력계 시스템을 이용하여 신호원과 측정센서 사이의 거리를 조절해가며 측정된 결과와 이를 바탕으로 한 전산시뮬 방법을 이용하였다. 신호원을 이상적인 경우와 실제 심장신호로 하여 거리에 따른 신호의 크기 감소율과, 1차 및 2차 미분계의 신호

크기를 조사함으로써 개략적인 최소 신호감소 구간을 확인할 수 있었다. 또한 실제 제작된 소수의 미분계를 이용하여 측정된 심장 신호와 전산시뮬 방법을 이용한 미분신호의 크기를 비교했을 때 4 % 미만의 오차율을 나타내는 것으로 보아 자력계를 이용한 전산시뮬 방법이 기저선에 따른 미분계의 특성을 조사하기에 충분한 정확성을 가짐을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 전문연구랩 사업으로 수행되었습니다.

References

- [1] J. Vrba, "SQUID Gradiometers in real Environment", In: *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications*, ed. By H. Weinstock, NATO ASI Series, Kluwer Academic publishers, Dordrecht/Boston/London, pp. 117-178.
- [2] A. Garachtchenko, A. Matlashov, R. H.Kraus, Jr, "Baseline Distance Optimazation for SQUID Gradiometers", Unpublished.
- [3] Y. H. Lee, H. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park and J. C. Park, *Inst. Phys. Conf. Ser.* 167, 545(2000).
- [4] C. S. Kang, Y. H. Lee, H. Kwon, J. M. Kim, K. K. Yu, Y. K. Park, S. G. Lee, "The Characteristics of DROS magnetometer and MCG measurement", *Progress in superconductivity*, Vol.8, No.2, pp. 164-168.