

위험물탐지를 위한 수상 자력탐사

조철현¹⁾ · 정용현²⁾ · 이효진¹⁾

A Magnetic Survey on the Lake for the Detection of the Unexploded Ordnances

Churl-hyun Jo¹⁾, Yong Hyun Jung²⁾ and Hyo Jin Lee¹⁾

요 약 : 호저에 매몰되어 있을 가능성이 있는 미폭발 매설물의 탐지를 위해 수상자력탐사를 수행하였다. 자력계는 2개의 총자력계를 이용한 자력변화율측정기(magnetic gradiometer)를 사용하였으며, 수상에서의 위치 측정은 실시간 이동측량(real time kinematic survey)으로 수행하였다. 위험물의 크기를 가정하여 예상 이상반응을 계산하고 이들에 대한 탐지 가능성을 살펴보았다. 조사선의 면적이 좁아 조사선 및 자력계 외 다른 장비의 자성이 측정에 영향을 미쳤으며 이들은 조사선의 방향이 바뀔 때 따라 크기의 변화가 있었다. 이들은 이동평균법에 기초하여 영향을 제거하도록 하였다. 탐사결과 호저에 매설되어 있는 관로의 노선이 파악되어 탐지능력을 간접적으로 확인할 수 있었다.

주요어 : 수상 자력탐사, 자력변화율측정기, 실시간 이동측량

Abstracts : A magnetic survey on the lake was carried out to explore the possible UXO (unexploded ordnance) under the water. A magnetic gradiometer with 2 magnetometer sensors was used, which measures total magnetic intensity. For the positioning of the measurement points on the water, RTK (real time kinematic) survey system was used. The theoretical responses were calculated assuming the dimension and the material of the UXO so that the detectability could be investigated. Since the areal size of the survey vessel was rather small, the influence from the magnetic material of the vessel and the other equipments such as a laptop computer was not negligible, and the influence did not remain constant during the survey due to the change of survey direction. These effects were reduced remarkably using moving average technique. The result reveals the lineament of a pipe line laid on the bottom of the lake, which can be regarded as an indirect proof of detectability of the method.

Keywords : magnetic survey on the lake, magnetic gradiometer, real time kinematic survey

서 론

우리나라에는 아직도 지난 1950~1953년 동안에 있었던 한국전쟁의 흔적이 많이 남아있다. 여러 종류의 불발포탄들도 그 예들 중의 하나이다. 특히 호수, 바다, 강에는 폭탄이 떨어질 때 충격이 작아 불발 확률이 상대적으로 높아 미폭발물(UXO; unexploded ordnance)의 존재가능성이 많다. 본 탐사는 동해안의 한 호수에서 준설작업에 앞서 호수 바닥 부근에 존재할 수 있는 폭발물의 위치를 탐지함으로써 합리적인 준설작업 계획 수립 및 향후의 안전관리에 이바지하는 데 그 목적이 있었다.

UXO 탐사방법에는 자력탐사, 전자탐사, GPR 탐사 등이 흔히 사용되고 있다. 그러나, 본 지역은 바다와 근접하여 위치하고 있으므로 해수가 침입되어 있고, 또한 주변 인가에서 유출되어 온 하수로 인해 전기전도도가 0.1~0.3 S/m로 비교적 높은 상태이다. 따라서 GPR이나 전자탐사로는 탐지가능성이 높

지 않다고 판단되어 자력탐사만을 사용하였다. 물론 이에 한 정된 비용의 문제도 고려되어 있다. 자력탐사의 현실적인 정확도를 높이기 위해, 자력변화율측정기(magnetic gradiometer)를 사용하였다. 본 조사구간의 수심을 감안하고, 포탄의 크기를 가정하여 이론적인 자력이상반응을 계산하였으며 주어진 수심과 채택된 자력변화율측정기의 정확도를 고려하여 측선간격을 정하였다. 수상탐사에서 그 중요성이 더욱 부각되는 위치측량은 실시간 이동측량(RTK; real time kinematic) 기법을 채택하여 수행하였다.

이론적인 자력반응 계산

폭발물의 크기 및 재원을 가정하여 이론값을 계산하였다. 폭발물이 함포사격용 포탄이라면 지름은 약 20 cm 내외일 것이고 길이는 70 cm에서 1 m까지로 예상할 수 있다. 또한 포탄의

*2002년 9월 6일 접수

1) 지하정보기술(주)(Subsurface Information Technologies, Inc.)

2) 지하정보기술(주)(현재, (주)위즈도메인)

외부는 금속체, 내부는 화약류와 금속체가 혼재하여 있을 것으로 예상된다. 이 경우 편의 상 포탄을 구형자성체로 가정할 수 있다. 구형자성체의 자력반응은 다음 식(Telford *et al.*, 1976)으로 구해질 수 있다.

$$Z = \frac{kVZ_0}{z^3} \left\{ \frac{2 + 3(x/z)\cot I - x^2/z^2}{(1 + x^2/z^2)^{5/2}} \right\} \quad (1)$$

$$H = \frac{kVZ_0}{z^3} \left\{ \frac{(2x^2/z^2 - 1)\cot I + x/z}{(1 + x^2/z^2)^{5/2}} \right\} \quad (2)$$

여기서 V 는 구체의 체적이며, x 축은 N-S방향이다. 나머지 위의 변수에 대한 설명은 Fig. 1에 나타내었다. 총 자기장의 크기(T)는 $\sqrt{H^2 + Z^2}$ 으로 계산될 수 있다.

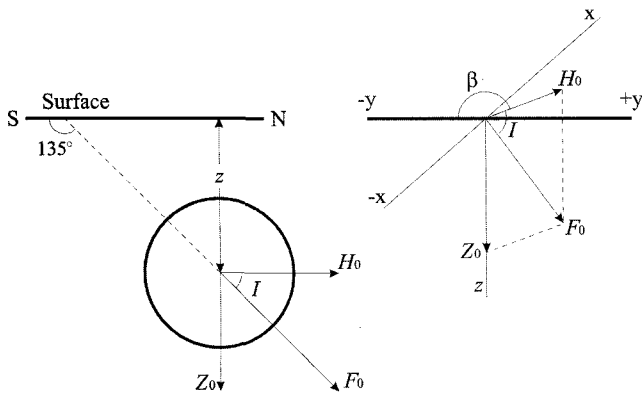


Fig. 1. Sphere polarized in the Earth's field (after Telford *et al.*, 1976).

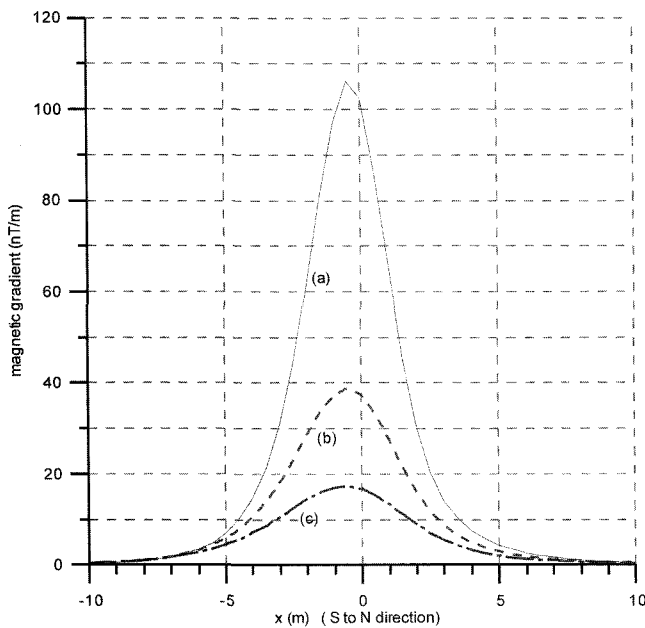


Fig. 2. Magnetic effect of a sphere with diameter 50 cm where the level difference between lower sensor and the center of the sphere is (a) 3 m, (b) 4 m, and (c) 5 m. The magnetic susceptibility of the sphere is 1 and the Earth's magnetic inclination is 50 degree.

탐사 목적이 되는 물체를 직경 50 cm의 철재 구로 가정하고 $k=1, F_0=50000, I=50^\circ$ 로 두면 (1)과 (2)식에 의하여 이론적인 총자기장을 높이에 따라 구할 수 있다. 자력수직변화율 측정 시 센서의 높이차는 1.3 m이며, 낮은 위치에 있는 자력센서와 구체의 중심과의 거리를 각각 3 m, 4 m, 5 m로 변화시키면서 계산한 수직변화율은 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 철재구가 수면에서 3 m 아래에 존재할 경우 구의 직상부에서는 약 800 nT/m 정도의 변화를 이상값을 나타냄을 알 수 있고 철재구의 깊이가 깊어짐에 따라 이상값의 크기가 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 한편 폭발물의 전체부피는 지금까지 예상한 철재구의 크기보다 다소 커질 수 있지만 내용물은 화약류와 혼재하고 있으므로 철만의 부피는 고려된 구의 부피보다 더 작을 수 있다. 식 (1)과 (2)에 의하면 자력반응은 부피에 비례하므로 자성체의 부피가 1/2 혹은 1/4로 줄어들어 따라 반응도 같은 비율로 감소하게 된다.

현장 잡음 등을 고려하여, 의미있는 이상반응의 최소 수준을 약 20 nT/m라고 하고 측선간격을 5 m 정도로 한다면 이 정도 규모의 이상반응이 최대값을 보이는 지점에서 반경 2.5 m까지도 나타나야 한다. 만약 폭발물내의 철재부피가 지름 50 cm인 구체의 부피와 같다면 수심이 약 4 m에서 측선 간격 5 m 정도로 수행하여도 이상반응을 감지할 수 있음을 알 수 있다. 만약 대상체 내의 철재부피가 고려되는 철재 구체의 50% 수준이라고 가정한다면, 측선간격 5 m의 탐사설정으로는 수심이 약 3 m 정도이어야 탐지가 가능함을 알 수 있다. 본 연구에서는 폭발물의 자성체가 직경 50 cm 철재 구체의 50% 이상의 부피를 지닌다고 가정하고 수행하였다.

자료취득

조사선의 위치 측량

수상탐사에서는 육상탐사에서도보다 탐사측점에 대한 정확한 측량 과정이 문제가 될 수 있다. 본 연구에서는 실시간 이동측량(RTK)을 채택하여 조사선의 위치를 측량하였다. RTK법은 GPS(Global Positioning System) 측량의 한 방법으로서 반송파 해석방식의 실시간 처리방법에 속한다. GPS는 인공위성을 이용한 범지구적 위치결정 체계로, 일반적으로 정확한 위치를 알고 있는 위성에서 발사한 전파를 수신하여 관측점까지의 소요 시간을 관측하고 이를 통해 관측점의 위치를 구하는 체계를 지칭한다. 위성으로부터 방송되는 GPS 신호의 단독측위만으로는 대략 5~15 m의 오차범위를 가지는데, 이러한 GPS 오차 범위는 측위 지점의 수신기 수를 2대 이상으로 늘리고 오차를 취득/보정해 줌으로써 수 mm까지 줄일 수 있다. GPS 측량에 이용되는 오차보정법은 크게 후 처리법과 실시간 처리법으로 구분할 수 있는데, 실시간 처리법은 정확한 좌표값을 알고 있는 지점에 기준국 GPS를 설치하여 위치보정 데이터 - 기준점 좌표와 기준점에서 수신한 위성신호에 의해 계산한 좌표와의

차이 -를 취득하고, 이를 측위지점의 이동국 GPS로 전송하여 보정토록 하는 방식이다. 이 때 측량이 수행되는 이동국 GPS에서는 위성신호의 계산에 의해 취득한 좌표값에 기지국으로부터 송신된 위치보정 데이터를 합성하여 정확한 좌표를 실시간으로 결정할 수 있게 된다.

실시간 처리법은 코드처리방식의 DGPS(differential GPS) 측량법과 반송파 처리방식의 RTK법(넓은 의미로는 RTK법도 DGPS의 일종이다.)으로 나누어지며, DGPS 측량시 0.2~1 m, RTK 측량시 0.01~0.02 m의 오차범위 내에서 정밀한 측량이 가능하다. GPS에 의한 위치측량은 조성준 등(2002)에 상세히 설명되어 있다.

자력계

자력계는 Geometrics사의 G-858G를 사용하였다. 본 시스템은 세습 광범핑 방식으로 총자기장의 절대값을 연속적으로 측정할 수 있으며 감도도 매우 높아 약 0.01 nT의 정밀도를 가진다. 자료측정간격은 1초 간격으로 정하였으며, 상하 혹은 좌우 2개 센서 위치에서 총자력치가 측정, 기록된다. 2개의 자기장 측정센서를 수직으로 이격, 고정하여 수직변화율을 추출할 수 있도록 설정하였으며, 상/하 자기장 측정센서 사이의 고도

차이는 1.3 m이었다. 이렇게 얻어진 자력수직변화율 측정자료는 주변 잡음과 광역적인 자기장의 분포 그리고 자기장의 일 변화 등의 영향을 받지 않으므로 호수지면에 존재하는 국부적 이상체에 의한 자력이상값만을 강조하는 장점을 갖는다.

자료취득 및 처리

Fig. 3에서와 같이 육상에는 RTK 측량을 위한 기지국 GPS 안테나를 설치하고 탐사선의 GPS 안테나로 위치보정신호를 송신하게 하였다. 탐사선에는 기본적으로 자력탐사장비, 측량장비가 탑재되었으며, 잡음요인이 될 수 있는 철재류는 최대한 배제시키도록 하고, 부득이한 경우 사전시험을 통해 자력계에 미치는 영향이 최소화되는 위치에 탑재하였다. 측정자료는 측량자료와 자력변화율자료가 측량기와 자력계에 각각 따로 기록, 저장된다. 따라서 이들 두 장비 사이에는 정확한 동기화가 필요하다. 이 때 자력측정은 정확한 시간간격으로 수행되지만 측정 위치는 GPS 신호가 수신될 때만 기록되므로 기록간격이 다소 불규칙하다. 따라서, 측정 위치는 자력측정시간을 기준으로 선형적으로 변한다는 가정 하에 측량자료를 내삽에 의해 계산하고 취합하였다. 탐사 측선도는 Fig. 4에 도시된 바와 같으며 Fig. 5에는 측정된 자료들을 처리하여 최종적으로

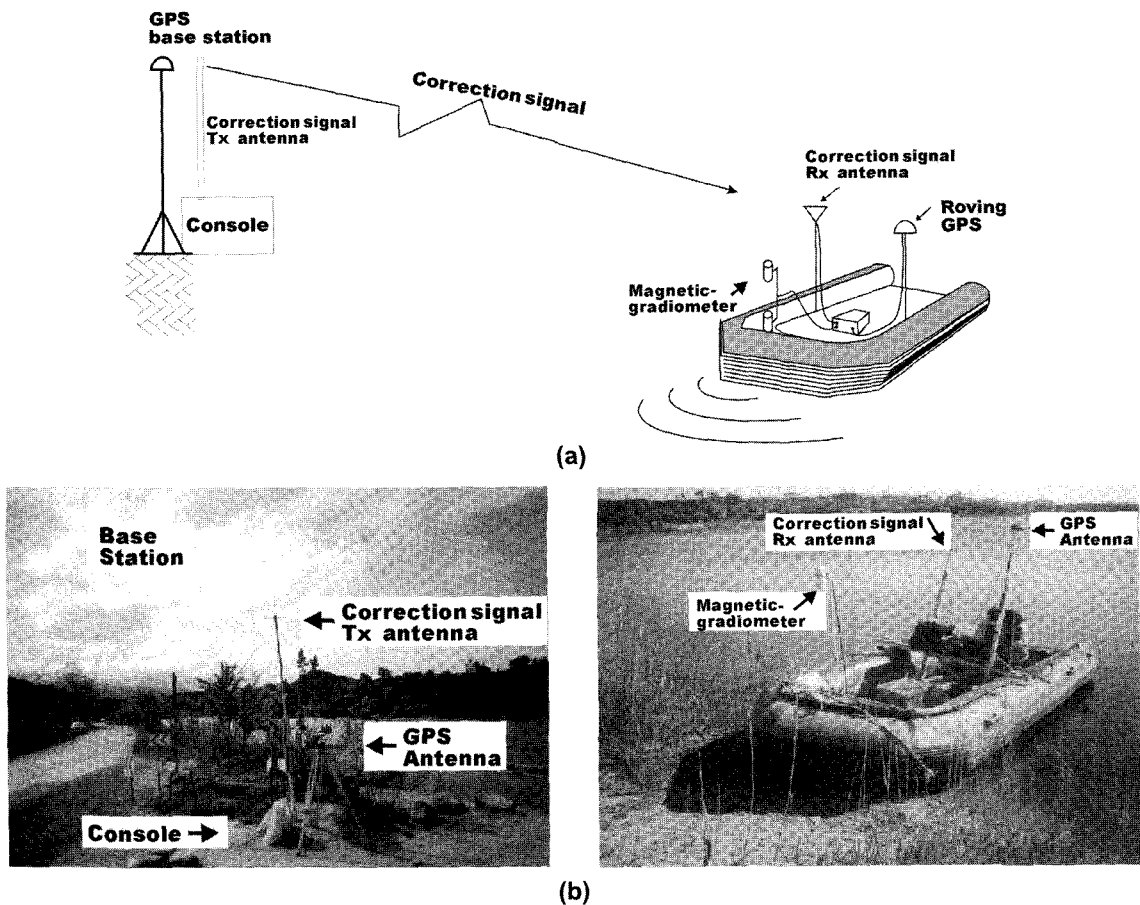


Fig. 3. (a) Schematic diagram of RTK positioning for magnetic survey on the lake, and (b) the pictures of the equipments in the field.

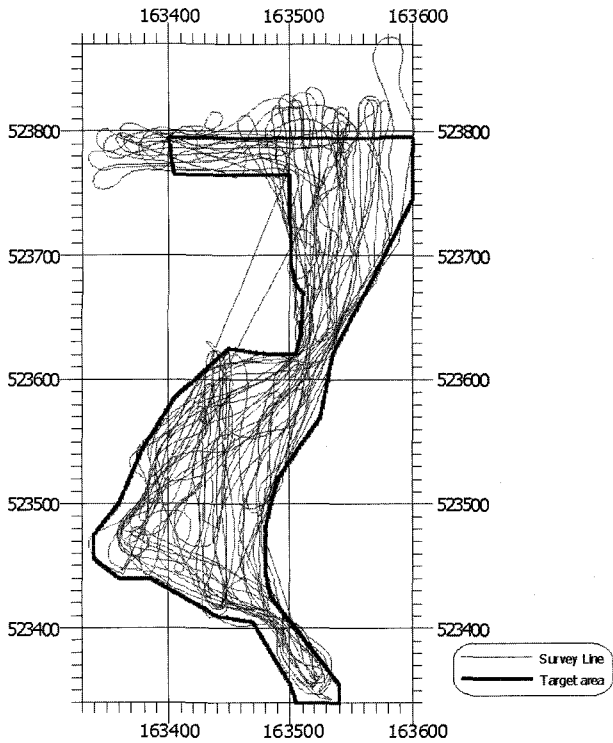


Fig. 4. Survey line of the target area The unit of easting and northing is meter.

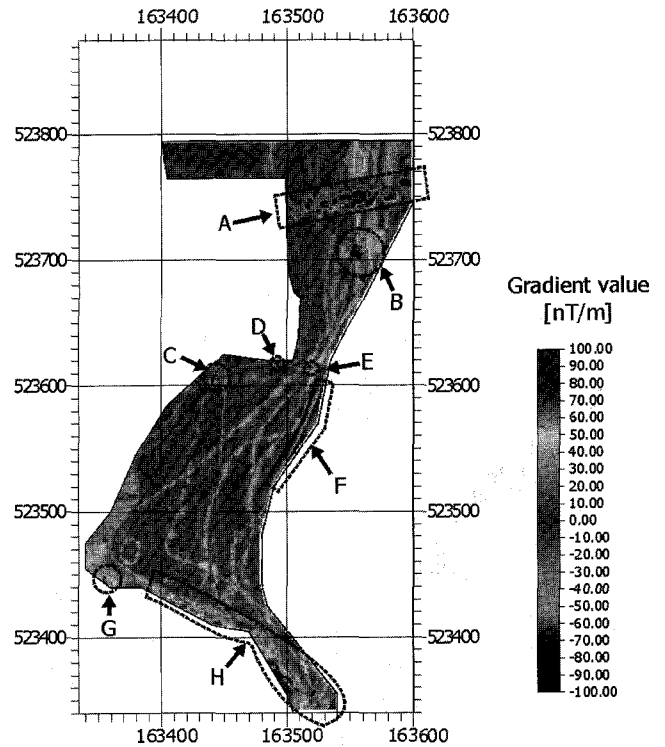


Fig. 5. Vertical magnetic gradient map of the survey area.

제작한 자기장의 수직변화율분포도를 나타내었다.

여러 이상대를 볼 수 있지만, 수직변화율을 도시하였음에도 도면에는 선형의 이상대가 형성되는 현상을 나타내었다. 이러한 현상의 원인은 측정 조건의 변화로 인해 특정 측선의 자료 취득 시 탐사선 내에 존재하는 자성체의 위치 변화에 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 변화는 (1) 여타 측선에는 없던 자성체를 선박내에 놓았거나, (2) 자성체 자체의 존재는 동일하더라도 자성체와 자력계와의 상대적 위치가 변화한 것 등 때문일 가능성이 있다. 이러한 측선의 영향을 제거하기 위해 공간 필터링을 수행하였다. 이러한 처리는 이동평균에 기반한 고주파 통과필터로서, 조사선의 궤적을 따라 측정점의 전후 2N 지점에서의 평균값을 산출하고 이를 측정값에서 제하는 공간적 필터링을 수행하였다.

$$D'(i) = D(i) - \frac{1}{2N} \left[\sum_{j=i-N}^{i-1} D(j) + \sum_{j=i+1}^{i+N} D(j) \right] \quad (3)$$

여기서, $D'(i)$ 는 자료처리를 거친 i 번째 측정점에서의 자력값이며, $D(i)$ 는 현장에서 취득한 i 번째 측정점에서의 자력값이다. Fig. 6은 N 을 6으로 했을 때의 결과이다. Fig. 5와 비교해 볼 때 측선을 따라 형성된 이상대는 제거되었음을 알 수 있다. Fig. 5에서 A로 표기한 이상대는 Fig. 6에서 A'으로 나타나며 이는 호수에 매설된 파이프라인의 반응이다. 여타 대개의 이상대는 거의 그대로 나타나지만 Fig. 5에서 F로 표시된 선

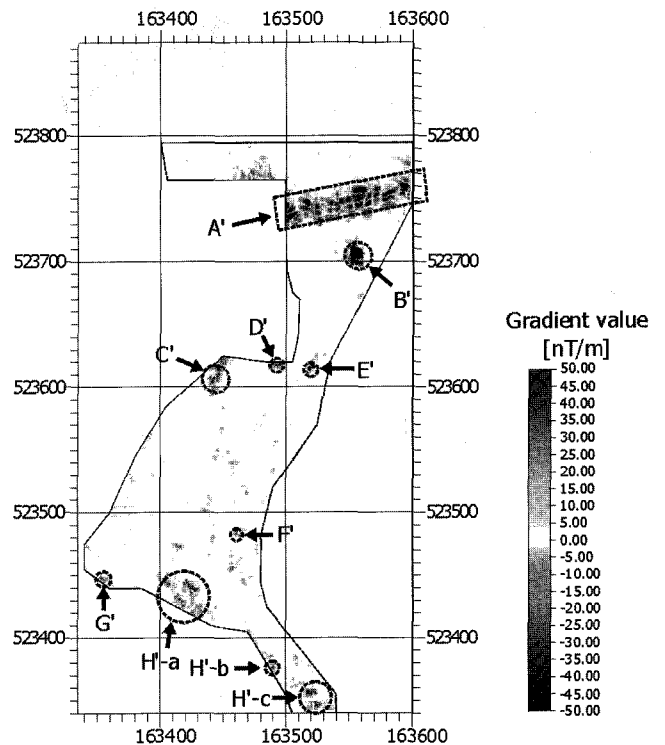


Fig. 6. Vertical magnetic anomaly map after moving average filtering.

형 이상대는 제거되었다. 또한 Fig. 5의 H 이상대는 Fig. 6에서 H'-a, H'-b, H'-c로 분리되어 나타났다.

토의 및 결론

호수의 준설 예정 지역에서 위험물탐사를 위하여 자력탐사를 실시하였다. 자력측정은 1.3 m의 이격거리를 갖는 2개의 자기장 측정 센서를 수직으로 설치하여 자력수직변화율을 측정하여 국부적인 이상대의 파악에 중점을 두었다. 이론연구 결과, 위험물이 지름 50 cm의 철재구체와 같은 규모의 자성체를 지니고 있다면 수면 하 약 4m에 존재하여도 탐지가 가능함을 알 수 있었으며, 위험물이 이러한 규모의 자성을 가진다는 가정하에서 수행하였다.

이론연구에서 예상된 이상대의 범위를 $\pm 20 \text{ nT/m}$ 이상으로 삼았으며 이러한 이상값을 나타내는 범위인 금속체 직상부 위치 $\pm 2.5 \text{ m}$ 를 감안하여 측선의 간격은 5 m를 기준으로 삼았다. 위치 측량은 높은 정확도를 유지하면서 실시간으로 측점을 정의할 수 있는 실시간이동측량(RTK)을 이용하여 수행하였다.

이상과 같은 탐사 및 자료의 처리 및 해석을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 자력탐사 장비와 위치측정장비의 상호 동기화가 전제되어야 한다. 이는 위치가 결정될 때 탐사자료가 동시에 취득되도록 하는 것이 가장 바람직하나, H/W와 S/W를 아우르는 시스템 구성이 요구되므로 최소한 두 장비 내부의 시스템 클락의 동기화라도 가능한 한 정확히 설정하도록 해야 한다.
- 2) 자력변화율탐사가 수행되더라도 항상 지하 국부적 이상체에 의한 이상값만을 측정하는 것은 아니므로 탐사자가 몸에 지니는 자성체에 대한 고려가 심각히 이루어져야 한다. 이러한

기본적 고려 사항 이외에도 조사선 내부에 불가피하게 존재하게 될 자성체 - 컴퓨터 등 기록장치 -가 측선 방향이 바뀔 때 따라 측정값에 미치는 영향이 있을 수 있으므로 이들을 적절히 제거하는 작업이 필요하다. 본 연구에서는 간단한 이동평균법에 기반한 공간필터링으로 가시적 효과를 보였다.

3) 탐지 대상체의 자성에 대한 고려가 선결되어야 하며, 만약 수심이 깊은 곳에 존재하는 소규모 자성체에 대한 탐사인 경우 방수처리된 그리고 호저(하저/해저)바닥에 가깝게 내릴 수 있는 자력변화율측정기를 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

감사의 글

본 탐사에 사용된 장비를 임대하여 주고 친절히 장비사용법과 주의사항을 설명하여 준 한국지질자원연구원의 전기전자연구팀 여러분, 그 중에서도 조성준 박사님에게 감사를 드리며, 아울러 본 원고의 투박한 글투와 미숙한 부분을 자세히 지적하여 주신 임부택 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 조성준, 이성근, 설순지, 정승환, 2002, 물리탐사에 있어서 GPS 측위의 이용: 한국자원공학회지, **39**, 146-155.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., 1976, Applied Geophysics: Cambridge Univ. Press.