

## Magnertic Methods to Detect Mines and UXO

Derac Son\*

Department of Optics and Sensors Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Korea

(Received 6 June 2020, Received in final form 21 June 2020, Accepted 23 June 2020)

Mines have been used to protect army from enemy with cost effectively. In opposite site, quick detection and remove of mines are very important for movement of armed force. Measure and remove of UXO (UneXploded Ordnance) is one of very important problems for safety of peoples living that area after war. To countermeasure mine and UXO, EMI (ElectroMagnetic Impedance), EMI (ElectroMagnetic Induction), Magnetometer, and GPR (Ground Penetrating Radar) methods have been used. In this work, we introduced magnetic field measuring method to find location of mine and UXO because they are made by iron steel and earth magnetic field is distorted by them. The conditions of magnetometers and research trends, which are applicable to unmanned vehicle such as UGV, UAV, USV, and UUV are introduced.

**Keywords** : magnetometer, magnetic field measurement, flux-gate magnetometer, UXO, mine detection

## 자기적 방법을 이용한 지뢰 및 불발병기 탐지기술

손대락\*

한남대학교 광·센서공학과, 대전시 대덕구 한남로 70, 34430

(2020년 6월 6일 받음, 2020년 6월 21일 최종수정본 받음, 2020년 6월 23일 게재확정)

지뢰는 적은 비용으로 적의 이동을 저지하기 위한 수단으로 많이 사용되고 있고, 지뢰지역에서 병력을 효과적으로 이동하기 위해서는 지뢰의 탐지 및 제거를 효과적으로 빠르게 하는 것이 중요하다. 또한 전쟁이나 내란이 종료된 후에도 불발병기(UXO: UneXploded Ordnance)는 많은 일반 시민에게 위협이 되고, 또한 그 지역의 개발에 많은 장애가 되고 있다. 이들을 탐지하는 방법으로 전자기입피던스(EMI: ElectroMagnetic Impedance), 전자기유도(EMI: ElectroMagnetic Induction), 자력계(Magnetometer), 및 지표투과레이더(GPR: Ground Penetrating Rader) 방식이 사용되고 있다. 본 논문에서는 지뢰나 UXO가 철재로 제작되어 이 들로부터 발생하는 자기장을 측정하여 지뢰나 UXO를 탐지하는 방법에 대하여 기술하였다. 특히 무인기시대가 오면서 무인기인 UGV(Unmanned Ground Vehicle), UAV(Unmanned Aerial Vehicle), USV(Unmanned Surface Vehicle) 및 UUV(Unmanned Underwater Vehicle)에 적용할 수 있는 자력계의 조건과 연구동향에 대하여 기술하였다.

**주제어** : 마그네토미터, 자기장 측정, 플럭스게이트 마그네토미터, 불발병기, 지뢰탐지

### I. 서 론

지뢰는 적의 이동을 저지하기 위한 수단으로 많이 사용되고 있고, 반대로 아군이 효과적으로 이동하기 위해서는 지뢰의 탐지 및 제거를 효과적으로 빠르게 하는 것이 중요하다. 따라서 지뢰를 탐지하고 제거하는 기술은 전투력향상에 있어서 매우 중요하다. 불발병기(UXO: UneXploded Ordnance)는 전쟁 중에 사용된 포탄이나 폭탄 등이 폭발되지 않고 지하에

매설되어 있는 물체를 가리키는 포괄적인 명칭이다. 이들 불발병기는 전쟁이 끝난 이후에도 많은 일반 시민에게 위협이 되고, 또한 그 지역의 개발을 위해서도 이들 불발병기를 탐지하고 제거하는 기술이 필요하다. 지뢰나 UXO를 탐지하는 방법을 요약하면 Table 1과 같이 전자기입피던스(EMI: ElectroMagnetic Impedance), 전자기유도(EMI: ElectroMagnetic Induction), 자력계(Magnetometer), 및 지표투과레이더(GPR: Ground Penetrating Radar) 방식이 있다[1-4].

- 전자기입피던스(EMI: EletroMagnetic Impedance) 방식  
이 방식은 현재 가장 많이 사용하는 소형금속탐지기의 원리이며, 피탐지물체의 전기전도도( $\sigma$ )와 투자율( $\mu$ )에 의하여 탐

**Table I.** Principles of mine and UXO detection.

Parameter	Methods	Electro Magnetic Impedance (EMI)	Electro Magnetic Inductance (EMI)	Ground Penetrating Radar (GPR)	Magnetometer
Frequency		~MHz	~kHz	~100 MHz	dc~kHz
Phys. variable		$\sigma, \mu$	$\sigma, \mu$	$\epsilon$	$\mu, (BH)_{max}$
Object		Metal	Metal	All	Ferromagnetic
Depth		Low	Low	High	Depends on size (high)
Speed		High (App. Low)	Medium	Low Medium (high)	
Moving		Hand carry	Cart, Trailer, Helicopter	Cart	Hand, Cart, Trailer Helicopter

지코일의 impedance 변화를 측정하는 방식이다. 원리가 간단하고 전력 소모가 적고 소형으로 제작이 가능하여 Hand carry(손으로 휴대하는) 형으로 많이 사용하는 방법이다.

- 전자기유도(EMI: ElectroMagnetic Induction) 방식

이 방식은 송신기로 교류자기장을 발생시키고 수신코일로 피탐지물체에 의하여 발생하는 송신기 교류자기장 주파수와 같은 주파수 성분의 교류전압을 측정하는 방식이다. 이 원리는 피탐지물체의 전기전도도( $\sigma$ )와 투자율( $\mu$ )에 의한 신호크기가 피탐지물체가 없을 경우도 큰 전압이 유도되기 때문에 2개 이상의 수신코일을 사용, 피탐지물체가 없을 때 출력신호가 0이되게 차동으로 구동을 하고 있다. 이 방법을 기본적으로 송신기에서 교류자기장을 발생시키기 위한 전력이 필요하고 2개 이상의 수신코일에 유도되는 교류전압을 차동(difference)으로 구동시켜야 되기 때문에 센서의 크기가 비교적 크다. 따라서 손으로 휴대하기는 어려워서 대부분 수레(Cart)형으로 제작하여 많이 사용을 하고 있다.

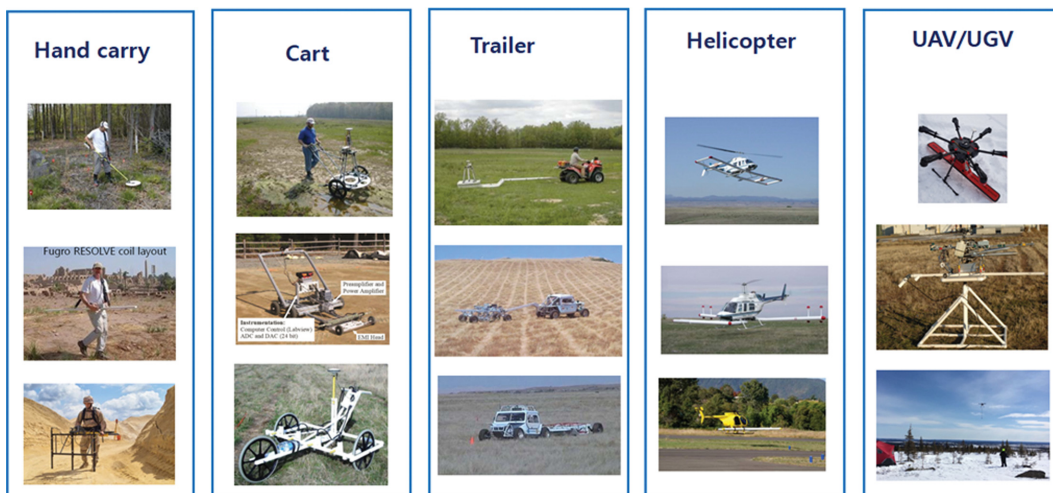
- 지표투과레이더(GPR: Ground Penetrating Radar) 방식

이 방식은 loop 안테나를 이용, 전자파를 발생하여 지하로 침투시키고 반사되어 나오는 전자파를 탐지하는 방식으로 지상의 레이더 방식과 같으나 땅내부로 침투를 시켜야 되기 때

문에 공중으로 전파시키는 레이더의 수 GHz와는 달리 수백 MHz 이하의 주파수를 사용하고 있다. GPR의 경우는 토양의 유전상수( $\epsilon$ )와 피탐지물체의 전기전도도( $\sigma$ ), 투자율( $\mu$ )에 모두 작용하며 유전상수( $\epsilon$ )의 효과가 크기 때문에 토양 속에 수분의 차이가 심한 즉, 수분이 많은 흙과 암반이 있을 경우 지뢰와 UXO를 탐지하기 매우 어려운 단점을 가지고 있다. 그러나 비자성, 비금속의 물체를 모두 탐지할 수 있는 능력이 있다.

- 자력계(Magnetometer) 방식

이 방식은 대부분의 지뢰가 철금속으로 되어있고 철금속이 자성체인 것을 이용하는 것으로 군사 부문에 많이 활용되어 온 분야이다. 지구가 거대한 자석이고 지구 전체에 지구자기장이 존재하며 우리나라의 경우 수평성분이 30  $\mu$ T, 수직성분이 40  $\mu$ T 정도 된다. 이 지구자기장에 의하여 철금속체가 자화되는 것을 유도자화(induced magnetization), 철금속체 구조물을 제조할 때 받은 응력에 의하여 영구적인 자화(permanent magnetization)가 생성되는데, 이 자화들에 해 존재하며 철구조물인 지뢰나 UXO가 있는 위치 근처에는 지구자기장의 왜곡(distortion)이 생기게 된다. 특히 함정을 탐지하는 자기감응기뢰, 탱크를 탐지하는 자기감응 대전차지뢰가 대표적인 예로서 함정이나 대전차가 철금속으로 되어있기 때문이다. 이러한



**Fig. 1.** (Color online) Sensors carrying method for mine and UXO detection.

기술을 포괄적으로 MAD(Magnetic Anomaly Detection) 기술이라고 한다. 지뢰나 UXO 또한 대부분 철금속으로 되어있기 때문에 같은 원리로 지구자기장의 왜곡이 작지만 발생하게 되고 이를 측정함으로써 지뢰나 UXO를 탐지할 수 있게 된다.

Fig. 1은 지뢰나 UXO 탐지센서를 이동시키는 방식을 보여주고 있다. 가장 전통적인 방식이 손으로 휴대하는 방식(Hand carry)이다. 이 방식으로는 EMI 센서와 자력계가 가능하다. 자력계의 경우 지구자기장의 상쇄 및 자세의 불안정을 극복하기 위하여 magnetic gradiometer를 사용하고 있다.

질량이 큰 센서의 경우나, 센서의 array 기능과 위치측정용 GPS를 추가한 경우 수레 방식을 많이 사용하고 있으나, 사람이 직접 움직여야 하기 때문에 측정 속도는 크게 향상되지 못한다.

측정 속도를 높이기 위한 trailer 방식은 유인차량이나 무인차량(UGV)이 견인하는 방식이다. 이 경우 충분한 무게를 감당할 수 있기 때문에 충분한 전력공급이 가능하며 긴 시간 넓은 영역의 측정이 가능하다. 그러나 자동차가 다닐 수 있는 지역에 한정하여 측정이 가능하다.

지형문제를 극복하는 방법으로 센서를 Helicopter나 UAV에 장착하여 측정하는 방법이다. 그러나 비행고도가 높을수록 지뢰나 UXO의 위치로부터 거리가 멀어지기 때문에 EMI(ElectroMagnetic Induction) 방식이나 magnetometer 방식 모두 자기장신호의 크기가  $1/r^3$ 으로 줄어드는 단점이 있다. 예를 들면 피탐지물체에 의한 자기장의 크기가 피탐지 물체로부터 1m 거리에서 10 nT였다면, 10m 거리에서는 0.01 nT가 되어서 사실상 측정이 매우 어려워진다. 특히 안전한 비행을 위하여 비행고도를 지면으로부터 10m 이상 유지하여야 할 경우 현실적으로 많은 어려움을 가지게 되며 지형변화에 의한 자기장 분포, 지구자기장의 시간 변화 등 모든 것을 고려하여야 되는 어려움이 발생하게 된다.

## II. 자기장 측정 방법에 의한 지뢰 및 UXO 탐지방법

본 논문에서는 자기장 측정 방법에 의한 지뢰 및 UXO 탐지방법에 한정하여 기술하려고 한다. 자기장 측정 방법을 이용한 탐지기술은 오랜 역사를 가지고 있다. 국방분야에서 자기분야는 지구가 커다란 자석이어서 BC 3세기부터 방위각 지시용으로 사용되었다. 무기체계가 기계적 특성이 우수하고 경제적인 철강으로 된 장치를 많이 사용하게 되고, 이 강철이 자기적 성질을 가지고 있는 자성체라는 지식이 알려지고, 이 자성체에 의하여 지구 자기장의 변화를 가져온다는 사실이 알려지면서 본격적으로 국방분야에 활용하게 되었다. Fig.

2는 비행기에 탐지코일(search coil)을 탑재하여 지구자기장의 왜곡에 의하여 Fraday's의 전자기유도 법칙에 의하여 기전력이 유도되고 이 기전력을 D'Arsonval type Galvanometer를 사용한 것이 MAD(Magnetic Anomaly Detection) 기술의



Fig. 2. (Color online) MAD method using search coil.



Fig. 3. (Color online) MAD method using using flux-gate magnetometer.



Fig. 4. (Color online) MAD method using atomic magnetometer.



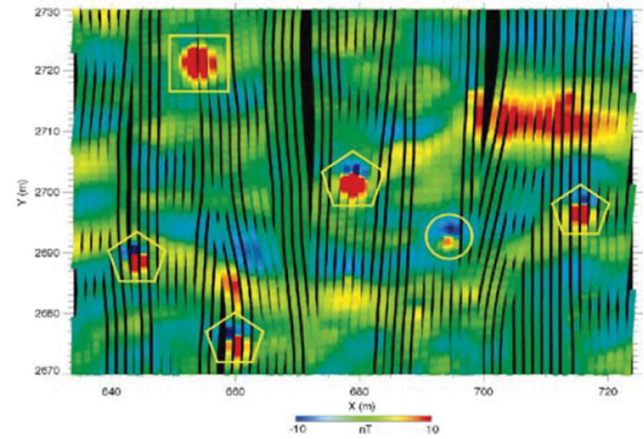
**Fig. 5.** (Color online) Hand carrying magnetic gradiometer with 1-axis flux-gate magnetometer for UXO detection.



**Fig. 7.** (Color online) Helicopter carrying gradiometer type atomic magnetometers for UXO detection.



**Fig. 6.** (Color online) Trailer carrying atomic magnetometer for UXO detection.



**Fig. 8.** (Color online) Graphical display of magnetic gradient field distribution of scanned area to find out UXO.

최초 응용으로 생각된다. 2차 세계대전에는 Flux-gate 자력계가 발명되어 진공관 증폭기를 사용 효과적으로 측정을 하게 되었다(Fig. 3). Fig. 4는 오늘날 현대화된 MAD 센서로 원자의 전자가 자기장에 의하여 에너지 준위가 분리되는 Zeeman 효과를 이용한 total field 측정 장치를 보여주는 것으로 우리나라에서도 도입 운용되고 있다.

바다에서 잠수함이나 함정을 자기적으로 탐지하는 기술은 함정이나 잠수함이 수천 톤 이상으로 커서 자기 모멘트(magnetic moment)가 크기 때문에 높은 고도에서 빠른 비행 속도로 측정이 가능하다. 20세기 후반에 센서 기술이 발달되면서 땅에 설치된 대인/대전차 지뢰를 탐지하는 데 Fig. 5와 같이 flux-gate 자력계를 사용하였다. 효율적으로 넓은 면적을

탐지하기 위해서 4개의 센서를 일렬로 배열하고 지구자기장보다 훨씬 작은 자기장을 측정하기 때문에 gradiometer 방식을 사용 지구자기장의 크기를 제거하고 있다. 21세기에 들어서는 보다 넓은 영역을 효과적으로 빠른 속도로 측정하기 위하여 Fig. 6과 같이 진동에 의한 측정의 오차를 줄이기 위하여 total field를 측정하는 scalar magnetometer를 여러 개 array로 배열하여 자동차로 견인하면서 측정하였고, 주변의 환경자기장을 보상하는 방법을 사용하게 되었다. 보다 측정 속도를 증가시키고 넓은 면적을 scan하기 위해서는 헬리콥터를 사용하여 Fig. 7과 같이 total field 자력계로 gradiometer를 구성하였고, 그 측정결과를 Fig. 8에 보여주고 있으며, 불발병기에 의한 수십 nT의 자기장 변화가 잘 측정됨을 보여 주고 있다. 넓은 영역에서 불발병기의 탐지는 미국국방부 환경 보안문제(environmental security technology certification program)로 많은 연구가 진행되었으며 많은 보고서가 나와 있다.

### III. 지구자기장 변화가 측정에 미치는 영향

Fig. 9는 지구자기장 발생 요인을 보여주고 있는 그림으로, 지구 mantle 층의 유도전류에 의한 자기장이 지구 자기장의 원천이지만 지구를 에워싸고 있는 ionosphere와 magnetosphere의 plasma 변화에 의한 자기장 변화도 지구자기장에 기여를 한다. Fig. 10은 지구자기장의 주파수 성분에 따른 변화량을 보여주고 있다[5]. 측정하고자 하는 주파수 영역의 자기장 크기가 그 주파수 영역의 지구자기장크기 보다 작을 경우 세심

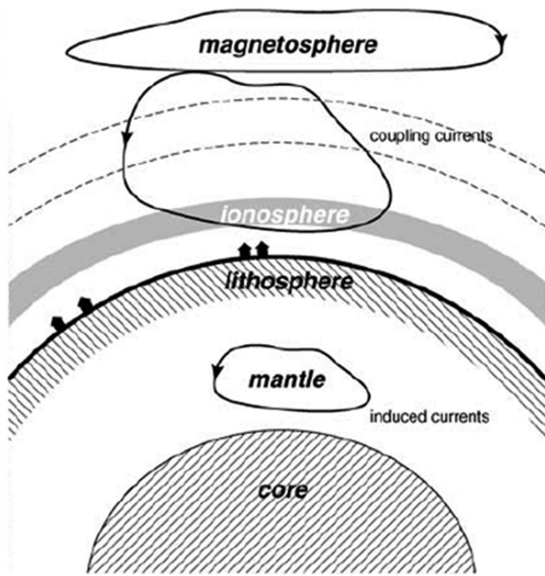


Fig. 9. Magnetic Sources of the Earth magnetic field.

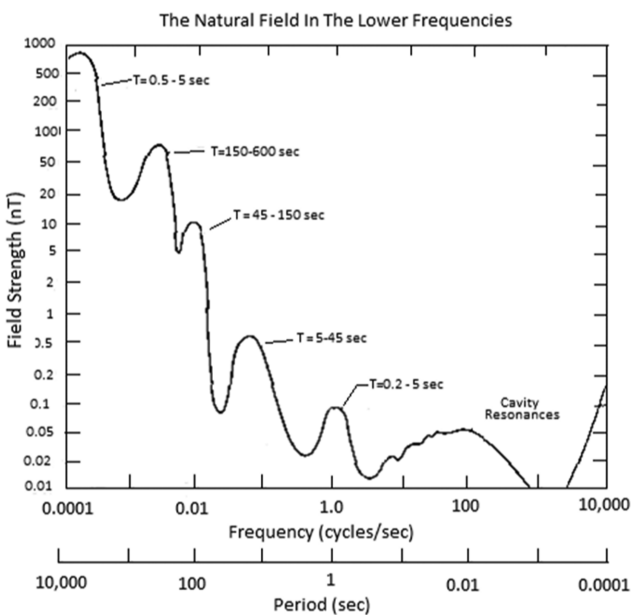


Fig. 10. Amplitude vs. time-frequency of the temporal variations of earth magnetic field variation.

한 주의가 필요하다. 예를 들면 1 Hz 영역에서는 0.1 nT로 작지만 0.1 Hz 영역에서는 0.5 nT, 0.01 Hz 영역에서는 10 nT 정도 됨을 보여 주고 있다. 이들 지구자기장의 변화는 지구의 위도와 경도에 따라 다르기 때문에 어느 특정 지역의 지구자기장 관측소의 지구자기장 값을 기준으로 보상이 어렵다. 예를 들면 고감도의 MAD 측정 장치로 잠수함을 탐지하는 경우 피탐지물체에 의한 자기장의 측정주파수는 비행속도와 측정고도에 의하여 결정되고 이 주파수 대역에서 지구자기장의 변화를 잘 고려하여야 한다. 다른 예로는 자기감응기뢰의 자기측정 분해능을 잘못 높이면 지구자기장의 변화에 의하여 기뢰가 자폭 될 수도 있다.

따라서 지뢰나 불발병기를 탐지하는데 있어서 탐지속도와 센서와 탐지대상물체사이의 거리에 따라서 탐지 측정주파수가 결정되기 때문에 세심한 주의가 필요하다. 만약 탐지거리가 멀지않으면 magnetic gradiometer 방식을 도입하면 지구자기장의 시간 변화에 의한 문제는 극복할 수 있다.

### IV. UXO의 Magnetic Moment

지뢰나 UXO에 의하여 발생하는 자기장은 지구자기장에 의하여 유도되는 자화  $m_f$ 와 제작과정에서 발생하는 변형력 등에 의하여 발생하는 영구자화  $m_p$ 가 있다. 유도자화의 경우 탐지물체의 위치(위도 및 경도)와 탐지물체가 구형이 아닐 경우 물체의 방향과 지구자기장의 방향사이의 각도에 따라서도 다르게 된다. Fig. 11은 박격포탄과 수류탄의 거리에 따른 자기장의 크기를 측정한 결과로 박격포의 경우 1 m 거리에서 10 nT의 자기장 변화가, 수류탄의 경우 0.5 m에서 10 nT의 자기장 변화를 보여주고 있다[6]. 자기적 방법으로 지뢰나 UXO를 탐지하기 위해서는 대상물체에 대한 자기특성에 대한 연구결과를 많이 찾기가 어렵고, 이분야에 대한 연구가 많이 수행되어야 될 것으로 생각된다.

### V. 자기장을 측정하는 센서

#### 1. 자기장측정센서의 원리

Table II는 현재 까지 개발되어 사용되고 있는 자력계의 원리를 보여주고 있다. 자력계의 원리를 자기장의 크기를 측정하는 scalar magnetometer(total field sensor)와 1-축의 성분만을 측정하는 vector magnetometer(single axis sensor)로 구분된다.

1-축 센서의 경우 자기잡음이 1 nT 이하이고 센서의 출력 특성이 피측정 자기장에 대하여 홀함수(odd function)이고 상온에서 작동되면서 질량이 크지 않은 센서가 AMR과 flux-gate 방식이 있다. Hall 효과의 경우 분해능이 높지 않고, GMR,

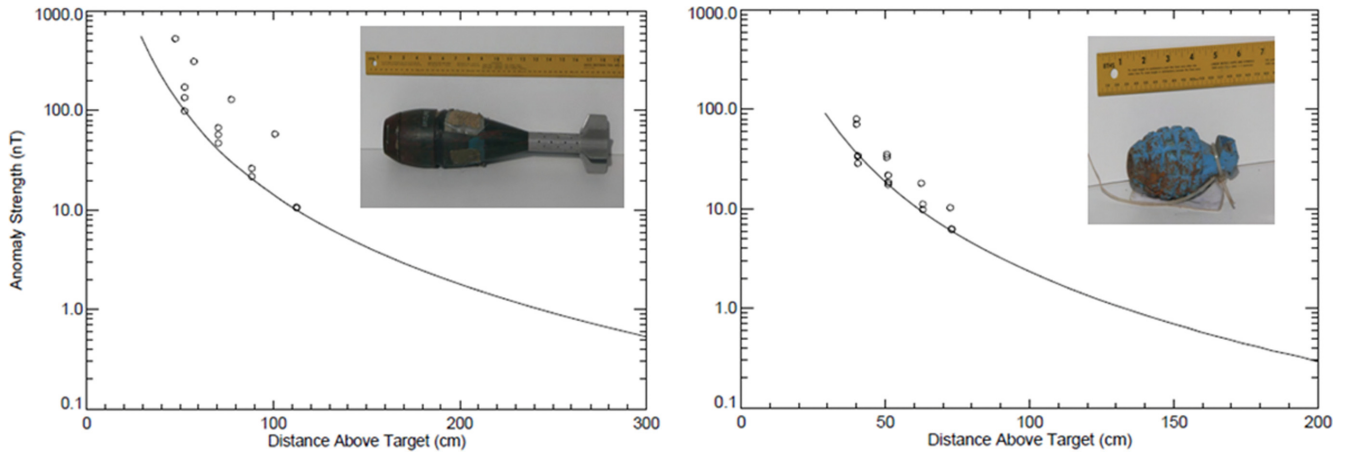


Fig. 11. (Color online) Magnetic field depends on the distance from UXO.

Table II. Principles of magnetometers for low magnetic field measurement.

Single axis sensor		Noise	Total field sensor
Hall effect	sensitivity	10 nT	Spin of proton
AMR	sensitivity	1 nT	Lamour precession: $4.258 \times 10^{-2}$ Hz/nT
GMR	$R(B) = R(-B)$	~nT	NMR, Proton precession, Oberhouser
GMI	$I(B) = I(-B)$	~pT	Spin of electron
Inductive	mass	~fT	He, Cs <sup>133</sup>
Flux-gate		~pT	Lamour precession: 4.316 Hz/nT
SQUID	low temp.	~fT	Noise level 0.4 pT/ $\sqrt{\text{Hzrms}}$
Fiber optic	$V(B) = V(-B)$	~10 pT	Spin Exchange Relaxation Free Atomic Magnetometer (SERFAM)
Mag. elect.	$V(B) = V(-B)$	~10 pT	(0.5 $\mu\text{T}$ ) ~fT

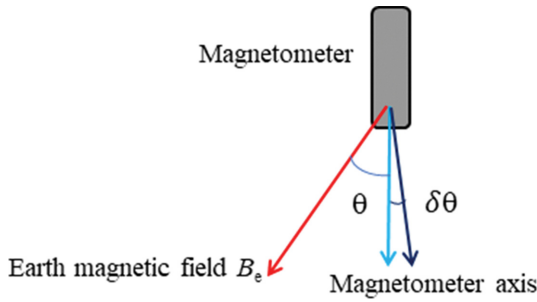
GMI, fiber optic 및 magneto-electric의 경우 센서의 출력특성이 피측정 자기장에 대하여 짝함수(even function)이고, SQUID는 액체 질소온도에서[7], 그리고 Inductive(search coil) 방식은 고감도의 낮은 주파수 대역 측정을 위해서는 그 크기가 커야 되고, 고투자율의 큰 코어가 필요하다. 따라서 실용적으로 사용될 수 있는 센서가 AMR과 flux-gate 방식이다. AMR의 경우 magnetic domain unstability 때문에 측정 시작 전에 pulse 전류를 인가하여 magnetic domain을 일정하게 배열을 시켜서 사용하나, 고감도의 응용에는 한계가 있어서 대부분 높은 고감도가 요구되지 않는 방위각 센서나 자동차 주차장 등에 많이 응용되고 있고, 군사용으로는 아직도 flux-gate 원리를 많이 사용하고 있다.

Total field magnetometer의 경우 양성자나 전자의 spin에 의한 magnetic moment를 활용하고 있으며, 양성자의 경우 Lamour precession 주파수가  $4.258 \times 10^{-2}$  Hz/nT로 nT의 분해능을 얻기 위해서는 수십 초의 시간이 필요하여 지뢰 및 UXO 탐지에는 적절하지 않다. 전자의 경우 Cs<sup>133</sup> magnetometer (AM: Atomic Magnetometer)의 경우 Lamour precession가 3.49872 Hz/nT로 1 nT의 분해능으로 초당 3번 이상 측정이

가능하다[8]. Cs<sup>133</sup> magnetometer의 경우 질량이 수 kg이고 전력소모가 수십 Watt 이상 되어 drone 사용에 적합하지 않아 MEMS 기술을 도입한 AM 즉 MFAM(Mems Fabricated Atomic Magnetometer)가 개발되어 drone에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다[9]. 또 다른 하나의 단점은 센서 축방향에 대하여 15°~75° 범위만 측정이 가능한 단점이 있어서 무인기 사용 시 측정 자세에 대한 각별한 주의가 필요하다.

2. 자세 불안정에 의한 문제의 극복

UGV, UAV, USV 및 UUV에 자력계를 장착할 경우 자세의 불안정, 진동 등에 의한 측정오차를 줄이는 것이 중요하다. 일반적으로 CCD 카메라와 같이 gimbals를 설치할 수도 없다. 왜냐하면 대부분의 gimbals가 각운동량 보존의 법칙을 이용하고 있고, 회전을 시키기 위하여 모터를 사용하고 있고 이들 모터가 자기장 잡음을 발생하기 때문이다. Fig. 12는 우리나라에서 드론에 자력계를 수직으로 매달아서 지구자기장을 측정하는 경우 지구자기장이 수직방향에서 37° 정도 비틀어져 있고 1nT 정도의 안정성을 유지하려면  $2 \times 10^{-3}$  deg. 정도로 자세가 안정되어야 한다. 따라서 1축의 자기센서를



**Fig. 12.** (Color online) The angle between Earth magnetic field and 1-axis magnetometer installed in drone.

이 각도로 안정성을 유지하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 이를 극복하려면 피측정 자기장 방향과 무관하게 측정할 수 있는 total field magnetometer나 Magnetic gradiometer로 구성하여야 한다. Magnetic gradiometer의 경우도 두 센서 사이의 각도가 비행체의 진동이나 자세 변화 등에서도  $2 \times 10^{-3}$  deg. 이하로 변하지 않아야 되는데 이 부분도 매우 어려운 기술이다. 따라서 대부분의 연구에서는 total field를 측정하는 atomic magnetometer를 사용하고 있다[1].

민약 지표면과 가까운 거리에서 고속으로 지뢰나 불발병기를 탐지할 경우 1 nT 이상의 분해능으로 10 Hz 이상의 측정 속도로 무인기에 사용하여야 될 경우 atomic magnetometer의 적용에 한계가 있다. 3-축의 flux-gate magnetometer로 total field를 측정하는 자력계도 연구하고 있다. Flux-gate magnetometer의 경우 1 nT 이상의 분해능으로 100 Hz 이상의 속도로 측정이 가능하기 때문이다. 그 원리는 Table III에서 보면 일반적으로 3-축의 flux-gate magnetometer를 제작하면 직각도가  $\pm 0.5^\circ$

정도이고, x-y, x-z, y-z 축에  $50 \mu\text{T}$ 의 자기장을 인가하면 각 좌표계의 3면에 대각선 방향으로  $70.711 \mu\text{T}$ 를 인가하는 효과이다. 이 경우 측정오차가  $\pm 400$  nT 정도 발생함을 보여주고 있다. 이 3-축 flux-gate magnetometer의 자기축 사이의 각도(magnetic angle between axis)를 3-축의 Helmholtz coil을 사용하여 정밀하게 측정하고, 수학적으로 보정하는 기법을 도입하여 total field를 측정하는 연구결과가 Table IV이다. 직각도는 Helmholtz coil 축사이의 직각도와 0.02도 이상 보정이 가능하고 total field 또한  $70.711 \mu\text{T}$ 에서  $\pm 2$  nT 정도의 불확도를 보이고 있다[10]. 이 기술은 앞으로 지상용 무인기의 MAD 기술에 기여할 것으로 생각된다.

## VI. 결 론

지뢰는 적은 비용으로 적의 이동을 저지하기 위한 수단으로 많이 사용되고 있고, 지뢰지역에서 병력을 효과적으로 이동하기 위해서는 지뢰의 탐지 및 제거를 효과적으로 빠르게 하는 것이 중요하다. 또한 전쟁이나 내란이 종료된 후에도 불발병기(UXO)는 많은 일반 시민에게 위협이 되고, 또한 그 지역의 개발에 많은 장애가 되고 있다. 이들을 탐지하는 방법으로 EMI(ElectroMagnetic Impedance), EMI(ElectroMagnetic Induction), 자력계, 및 GPR(Ground Penetrating Radar) 방식이 사용되고 있다. 본 논문에서는 지뢰나 UXO가 철재로 제작되어 이들로부터 발생하는 자기장을 측정하여 지뢰나 UXO를 탐지하는 방법에 대하여 기술하였다. 특히 무인기시대가 오면서 무인기인 UGV, UAV, USV 및 UUV에 적용할 수 있는 자력계의 조건과 연구동향에 대하여 기술하였다.

**Table III.** Orthogonality error of the conventional 3-axis magnetometer.

Applied field ( $\mu\text{T}$ )	x-Axis reading ( $\mu\text{T}$ )	y-Axis reading ( $\mu\text{T}$ )	z-Axis reading ( $\mu\text{T}$ )	90° angle error (°)	Measured total field ( $\mu\text{T}$ )
x-50	50.003	0.123	0.419	0.48	50.005
y-50	0.483	49.98	0.126	0.55	49.982
z-50	-0.046	-0.478	49.996	-0.55	49.998
x-50, y-50	50.487	50.109	-0.311		71.133
x-50, z-50	49.963	-0.353	49.64		70.341
y-50, z-50	0.435	49.516	50.106		70.446

**Table IV.** Improvement orthogonality error of conventional 3-axis magnetometer after orthogonality correction.

Applied field ( $\mu\text{T}$ )	x-Axis reading ( $\mu\text{T}$ )	y-Axis reading ( $\mu\text{T}$ )	z-Axis reading ( $\mu\text{T}$ )	90° angle error (°)	Measured total field ( $\mu\text{T}$ )
x-50	50.003	-0.006	0.012	0.014	50.003
y-50	0.009	50.009	0.013	0.015	50.009
z-50	-0.006	-0.006	50.005	-0.007	50.005
x-50, y-50	50.009	49.988	0.003		70.709
x-50, z-50	49.999	-0.014	50.000		70.710
y-50, z-50	-0.003	49.998	49.998		70.708

### References

- [1] ESTCP Project MM-0413, Apr. (2008).
- [2] ESTCP, MM-0633, 01 Dec. (2008).
- [3] ESTCP Projects 200037, Aug. (2005).
- [4] ESTCP, UX0031, July (2005).
- [5] A. J. Canciani, AFIT-ENG-DS-16-S-074, DEPARTMENT OF THE AIR FORCE AIR UNIVERSITY, Sept. (2016).
- [6] T. H. Bell, NRL/MR/6110—12-9385, Jan. (2012).
- [7] T. J. Gamey, SERDP, MM-1316, Aug. (2008).
- [8] G-822 and G-823A&B Cesium Magnetometer manual, GEOMETRIC Co.
- [9] T. Lee, Ph. D thesis, Ariforce Institute of Technology, Mar. (2019).
- [10] D. Son, J. Korean Magn. Soc. **29**, 171 (2019).