Journal of the KIMST, Vol. 18, No. 4, pp. 350-357, 2015
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2015.18.4.350

Research Paper 센서 · 신호처리 부문

항만 감시를 위한 수중 강자성 표적 탐지에 관한 연구

김민호*,1) · 주웅걸1) · 임창선1) · 윤상기1) · 문상택1)

1) LIG넥스원㈜ Maritime연구소

A Study on Detection of Underwater Ferromagnetic Target for Harbor Surveillance

Minho Kim*,1) · Unggul Joo1) · Changsum Lim1) · Sanggi Yoon1) · Sangtaeck Moon1)

1) *Maritime Research and Development Lab, LIGNex1 Co., Ltd., Korea*

(Received 27 October 2014 / Revised 8 June 2015 / Accepted 12 June 2015)

ABSTRACT

Many countries have been developing and operating an underwater surveillance system in order to protect their oceanic environment from infiltrating hostile marine forces which intend to lay mines, conduct reconnaissance and destroy friendly ships anchored at the harbor. One of the most efficient methods to detect unidentified submarine approaching harbor is sensing variation of magnetism of target by magnetic sensors. This measurement system has an advantage of high possibility of detection and low probability of false alarm, compared to acoustic sensors, although it has relatively decreased detection range. The contents of this paper mainly cover the analysis of possible effectiveness of magnetic sensors. First of all, environmental characteristics of surveillance area and magnetic information of simulated targets has been analyzed. Subsequently, a signal processing method of separating target from geomagnetic field and methods of estimating target location has been proposed.

Key Words : Ferromagnetic Target(강자성 표적), Harbor Surveillance(항만 감시), Detection(탐지), Exponential Moving Average(지수이동평균)

1. 서 론

2010년 3월에 백령도 인근 해상에서 대한민국 해군의 초계함인 PCC-772 천안이 피격되어 침몰하는 사건이 발생하였다. 천안함 침몰 사건의 합동조사단은 어뢰공격에 의한 침몰로 조사 결과를 발표하였고, 이 사건 이후 항만과 연안에 대한 방어의 필요성이 논의되어 왔다. 항만과 정박 중인 함정의 파괴, 기뢰 부설, 정찰 등의 목적으로 침투하는 수중 세력을 감시하기 위한 체계는 여러 나라에서 개발되어 왔다.

대한민국의 HUSS(Harbor Underwater Surveillance System), 미국의 UWACS(UnderWater ACoustic Sentinel) System 및 이스라엘의 APNS-Port Guard(Advanced Port

* Corresponding author, E-mail: minho.kim@lignex1.com
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology



Fig. 1. Conceptual diagram of HUSS and APNS-Port Guard

& Naval Assets Security System) 등 자국의 해양 환경에 맞는 수중 감시체계를 개발하여 운용하고 있다. Fig. 1은 대한민국의 항만감시체계 HUSS와 이스라엘의 APNS-Port Guard의 개념도이다.

방어의 시작은 감시라 할 수 있으며, 감시의 시작은 탐지다. 항만으로 접근하는 잠수함을 탐지하기 위한 효율적인 방법 중 하나는 자기센서를 이용하여 표적에 의한 자기장의 변화를 감지하는 것이다. 자기센서는 항만 근처에서 인계철선의 역할을 할 수 있다. 함정에 의해 발생되는 정자기장 신호를 이용하여 표적을 탐지하면 수중 방사소음을 감지하는 경우와 비교하여 상대적으로 거리는 감소하지만 근거리에서 탐지율(possibility of detection)은 높고 오경보율(probability of false alarm)은 낮은 장점을 가진다.

본 논문은 함정에 의한 수중 자기장을 이용하여 항만으로 침투하는 가상의 수중 강자성 표적을 탐지하고, 감시구역 안에서 표적의 위치를 추정하기 위한 연구 결과이다. 감시하고자 하는 항만의 환경 특성을 파악하기 위해 지구자기장을 측정하여 분석하였고, 가상 표적의 예상 탐지거리를 예측하였다. 또한 지구자기장과 표적의 자기장 신호를 분리하기 위한 지구자기장 보상 신호처리 기법을 제안하였다.

2. 환경 분석

감시구역의 자기장 변화량을 조사하기 위하여 OO항을 출입하는 위치에 센서를 매설하고 자기장을 측정하였다. 외부의 영향으로 자기센서가 훼손되는 것을 방지하기 위해 평균 1.5 m의 깊이로 매설하였다.

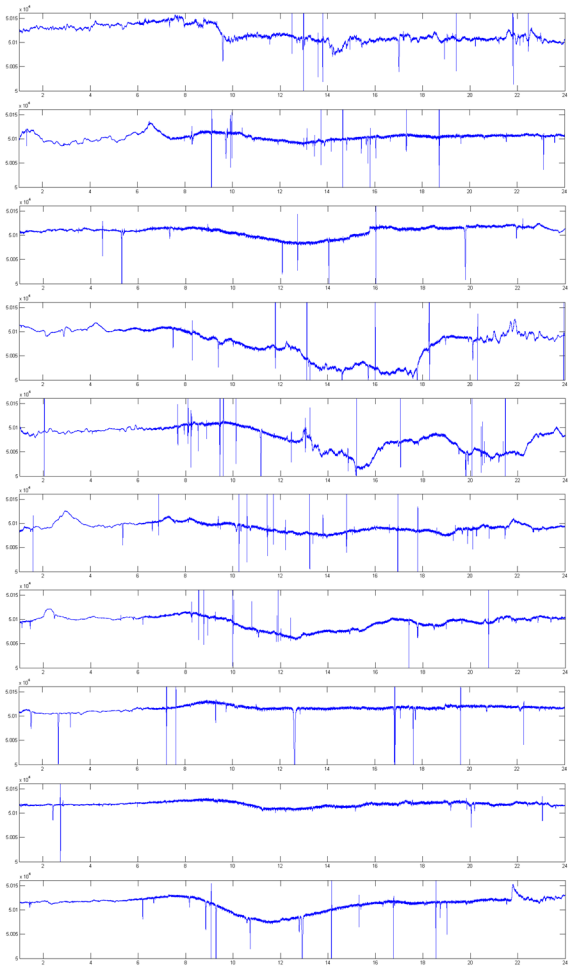


Fig. 2. Geomagnetic diurnal variation during 240 hours at harbor entrance

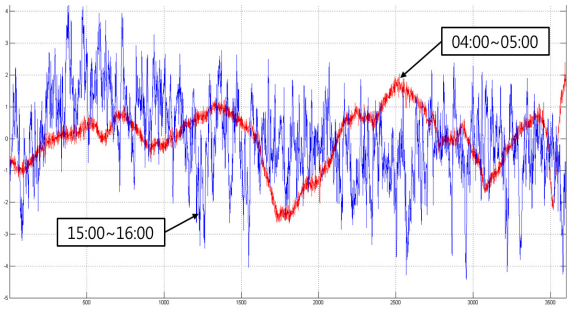


Fig. 3. Geomagnetic variation comparison of day and night

OO항 입구에 설치한 자기센서로 2014년 2월 13일 00시부터 2월 22일 24시까지 240시간(10일)동안 측정한 자기장의 변화를 분석하였다. Fig. 2는 OO항에서 10일간 측정한 자기장으로, 각 10개의 그림은 1일차 0시부터 10일차 24시까지 24시간 간격으로 나타낸 자기센서의 3축(x, y, z) 합성값이다.

10일간의 자기장의 일변화를 관찰하여 06시부터 다음날 01시까지 변화가 크고 01시부터 06시까지 변화가 적음을 발견하였다. Fig. 3은 두 시간대역의 변화량 차이를 분석하기 위하여 04시부터 05시 그리고 15시부터 16시의 측정값에서 off-set을 제거하고 두 값을 중첩한 것이다. 변화폭이 가는 실선은 04시부터 05시, 굵은 실선은 15시부터 16시까지의 측정값으로 시간대에 따라 변화량 차이가 명확함을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 전기철도의 운행시간과 일치한다는 점에서 센서 매설 지점으로부터 약 7 km에 위치한 전기철도의 영향으로 추정된다.

3. 표적 탐지

3.1 가상 표적 설정

감시대상은 해상교통로 차단, 기뢰 부설, 수상함 공격 및 특수전 부대 침투 지원 등의 임무를 목적으로 항만으로 침투하는 가상 수중 강자성 표적이다.

가상 수중 표적은 Table 1의 자기 다이폴 특성을 갖는다고 설정하였다. 실제 함정에 의해 발생되는 자기장 신호는 다수의 다이폴로 모델링 되어야 하지만 표적을 단순화하기 위하여 자기 다이폴은 하나의 3축 다이폴로 가정하였다. 가상 수중 표적의 자기 다이폴 특성은 표적의 자기장 신호를 생성하는데 사용하였으며,

Table 1. Magnetic dipole setting of virtual underwater ferromagnetic target

	Magnetic dipole [Am^2]		
	Mx	My	Mz
Virtual Target 1	206,800	51,700	61,200
Virtual Target 2	29,500	7,700	9,100
Virtual Target 3	14,200	3,700	4,400

생성된 신호는 탐지 거리를 예측하기 위하여 사용하였다.

강자성 표적의 자기장 신호는 강자성 재질의 선체 및 탑재장비에 영구적으로 자화되는 영구 자기장 성분, 함정 항해 방향 및 자기 위도 변화에 의해 일시적으로 유기되는 유도 자기장 성분, 함정의 요동에 의해 선체 표면에 발생되는 와전류 자기장 성분, 함정 내 각종 전력기기 및 전력선 등에 의한 누설 자기장 성분으로 구분된다[1]. 그중에서 영구 자기장 성분이 가장 크고, 영구 자기장 성분과 유도 자기장 성분이 발생 자기장의 대부분을 차지한다[2]. 강자성체로 이루어진 함정은 어뢰 및 기뢰로부터 생존성을 확보하기 위해 자기처리(Deperming)를 통해 영구자장을 최소화한다. 함정의 영구 자기장은 자기처리를 통해 효과적으로 상쇄되었다는 가정하에 유도 자기장으로 가상 표적의 자기장을 생성하였다[3].

3.2 가상 표적의 자기장 신호 생성

강자성 표적의 자기장 신호는 비오-사바르의 법칙(Biot-Savart's law)을 이용하여 계산한다. 하나의 다이폴 모멘트 $\vec{m}$와 자기장 신호 $\vec{B}$ 사이의 관계는 수식 1과 같다[4].

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi R^5} \begin{bmatrix} 3x^2 - R_{ij}^2 & 3xy & 3xz \\ 3xy & 3y^2 - R^2 & 3yz \\ 3xz & 3yz & 3z^2 - R^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

수식 1에서 [m_x, m_y, m_z]는 가상 수중 강자성 표적의 다이폴 모멘트, [B_x, B_y, B_z]는 가상 표적의 자기장 신호, (x, y, z)는 가상 표적의 다이폴 모멘트와 자기센서 사이의 거리, R은 $\sqrt{x^2+y^2+z^2}$, μ_0는 공기 중에서의 투자율이다.

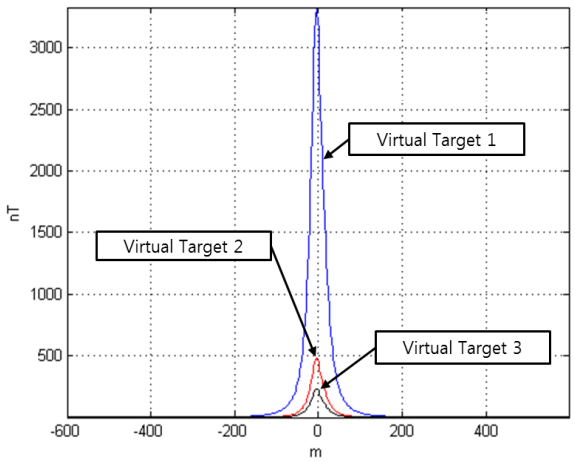


Fig. 4. Magnetic signature of virtual underwater ferromagnetic target

Table 1에서 설정한 가상 수중 강자성 표적의 자기 다이폴을 수식 1에 대입하여 가상 표적 1, 2, 3의 자기장을 모의로 생성하였다(Fig. 4). 자기센서의 매설 수심은 30 m, 표적은 수심 10 m에서 자남에서 자북방향으로 센서를 on-top으로 통과하도록 설정하였다.

3.3 지구자기장 보상기법

자기센서를 이용하여 잠수함을 탐지하는 방식은 MAD (Magnetic Anomaly Detection)와 MTD(Moving Target Detection)로 나눌 수 있다. MAD는 대잠초계기에 자기센서를 장착하고 저고도비행을 하며 잠수함의 상공을 지나갈 때 자기장의 변화를 탐지하는 방식이다. MTD는 센서를 해저면에 설치하고 강자성 표적이 센서 주위를 지나갈 때 발생하는 자기장의 변화를 탐지하는 방식이다[5-7].

본 논문에서 제안하는 신호처리 기법은 MTD에 기반을 두고 있으나, MTD에서 지구자기장을 보상하기 위해 Remote Reference Technique을 이용하는 것과 달리 지수이동평균을 적용하였다.

강자성 표적을 탐지하는 장비의 성능은 표적에서 생성된 자기장과 지구자기장을 분리하는 능력에 의해 좌우 될 수 있다. 항만시설과 같이 강자성체의 잦은 출현으로 자기장의 변화가 심한 지역에서는 표적의 영향을 받지 않는 센서를 이용하여 지구자기장을 보상하는 방식(Remote Reference Technique)은 유효하지 않다. 이에 본 연구에서는 지구자기장을 보상하기 위한 신호처리 기법으로 지수이동평균을 사용하였다. 지수이동평균을 이용하면 지구자기장의 변화에 강인함 특성을 가질 수 있으며, 지구자기장의 변화량이 다른 지역에서도 계수의 변경만으로 강자성 표적의 탐지가 가능하다.

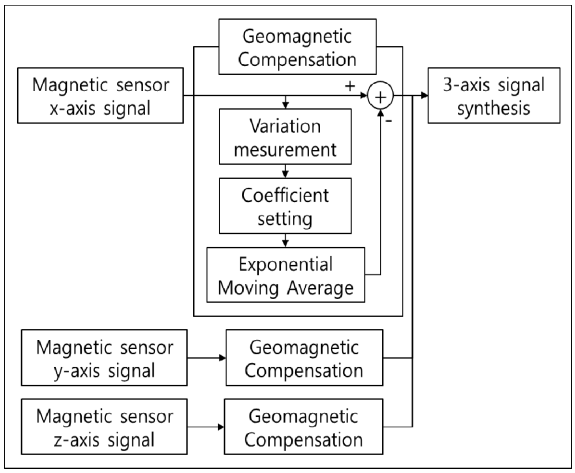


Fig. 5. Geomagnetic compensation diagram

지수이동평균을 이용하여 지구자기장과 표적의 자기신호를 분리하는 과정(Fig. 5)은 다음과 같다. 자기센서로 측정한 3축 신호에 지수이동평균을 적용한 후(수식 2), 자기센서로 측정한 3축 신호와 지수이동평균의 차를 구하고 합성한다(수식 3). 이때 지수이동평균의 계수를 조정하지 않으면 지수이동평균의 결과가 표적신호를 따라 움직여 표적신호와 지구자기장을 효과적으로 분리할 수 없다. 지수이동평균 계수의 기본 설정치는 0.1이며, 센서신호의 변화량이 탐지문턱치 이상이면 지수이동평균의 계수를 변화량과 반비례하게 조정하여 지수이동평균의 결과가 표적신호를 따라가지 않도록 한다(Fig. 6). Fig. 8의 2, 4, 6번 그림은 각각 x, y, z축 신호의 계수 조정 구간을 나타낸다. 0인 구간은 센서신호의 변화량이 탐지문턱치 이하이므로 지수이동평균의 계수를 기본값인 0.1로 설정하고, 1인 구간은 변화량이 탐지문턱치 이상이므로 계수를 조정한다.

$$\begin{aligned} op_x(t) &= a \times ip_x(t) + (1-a) \times op_x(t-1) \\ op_y(t) &= a \times ip_y(t) + (1-a) \times op_y(t-1) \\ op_z(t) &= a \times ip_z(t) + (1-a) \times op_z(t-1) \end{aligned} \quad (2)$$

$$S_{Target} = \sqrt{(ip_x - op_x)^2 + (ip_y - op_y)^2 + (ip_z - op_z)^2} \quad (3)$$

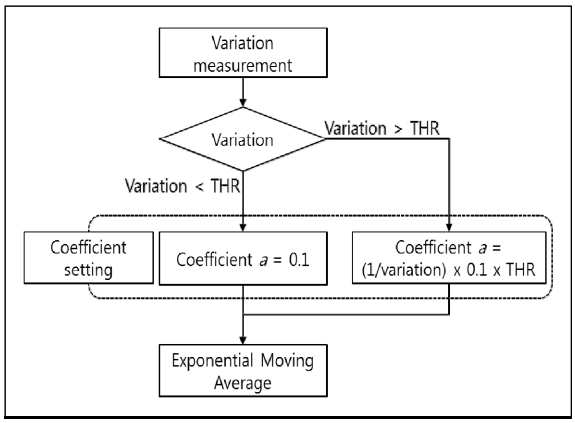


Fig. 6. Exponential moving average coefficient modification diagram

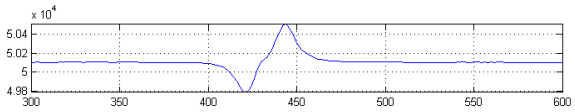


Fig. 7. Magnetic sensor signal 3-axis synthesis

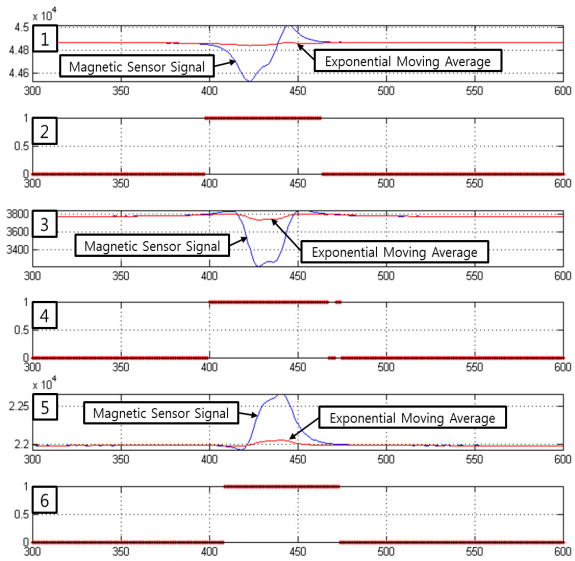


Fig. 8. (1) Magnetic Sensor Signal(x-axis) and exponential moving average(EMA), (2) x- axis signal coefficient modification section, (3) Magnetic Sensor Signal(y-axis) and EMA, (4) y-axis signal coefficient modification section, (5) Magnetic Sensor Signal(z-axis) and EMA, (6) z-axis coefficient modification section

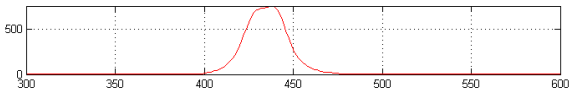


Fig. 9. Separated ferromagnetic target signal from geomagnetic field signal

수식 2에서 a는 지수이동평균의 계수, ip는 지수이동평균의 입력으로 사용되는 자기센서 측정값이며, op는 지수이동평균의 결과이다.

자기센서 측정신호와 지수이동평균의 결과의 차를 구하고 3축 신호를 합성하면, 지구자기장과 표적신호가 분리되지 않은 신호(Fig. 7)에서 표적신호를 분리할 수 있다.(수식 3, Fig. 9) 수식 3에서 S_{Target}은 자기센서로 측정한 자기장에서 지구자기장을 보상하여 획득한 표적의 자기신호이다. ip_x, ip_y, ip_z는 자기센서 측정값의 x, y, z축 신호이며, op_x, op_y, op_z는 ip_x, ip_y, ip_z의 지수이동평균 결과이다.

3.4 예상탐지거리

가상의 자기장 신호를 추정하고, 추정치를 이용하여 예상되는 탐지 가능한 거리를 분석하였다. 센서의 매설 위치를 수심 30 m로 가정하였고 표적의 기동 속도는 4 knots, 기동 수심은 10 m로 설정하였다. 표적은 센서를 자남에서 자북방향으로 bottom clearance 20 m on-top으로 지나간다고 가정하였다.

탐지 거리 예측은 자기장의 변화가 적은 02시와 자기장의 변화가 큰 14시로 나누어 분석하였다. OO항 근처를 지나가는 전기철도가 운행하지 않는 02시에 자기장의 변화는 ±1 nT 안에 있기 때문에, 오탐지가 발생하지 않도록 탐지 문턱치를 1.5 nT로 설정하였다. 표적이 센서로 접근하며 신호가 1.5 nT가 되는 지점과 멀어지며 1.5 nT가 되는 지점으로 탐지거리를 예측하였다. 가상표적 1, 2, 3의 예상 탐지거리는 각각 608 m, 317 m, 247 m 이다(Fig. 10 top).

동일한 방법으로 전기철도의 운행으로 자기장의 변화가 큰 14시의 탐지 문턱치는 3 nT로 설정하였으며, 가상 표적 1, 2, 3의 예상 탐지거리는 각각 482 m, 250 m, 196 m 이다(Fig. 10 bottom). 이는 10 m로 잠항하는 가상 표적 3을 탐지하고자 한다면, 자기센서 배치시 인접 센서와의 거리가 196 m를 넘지 않아야 한다는 것을 의미한다.

예상탐지거리 분석은 감시하고자 하는 항의 특성에 따라 설정값이 달라진다. 항만의 평균수심과 예상 기

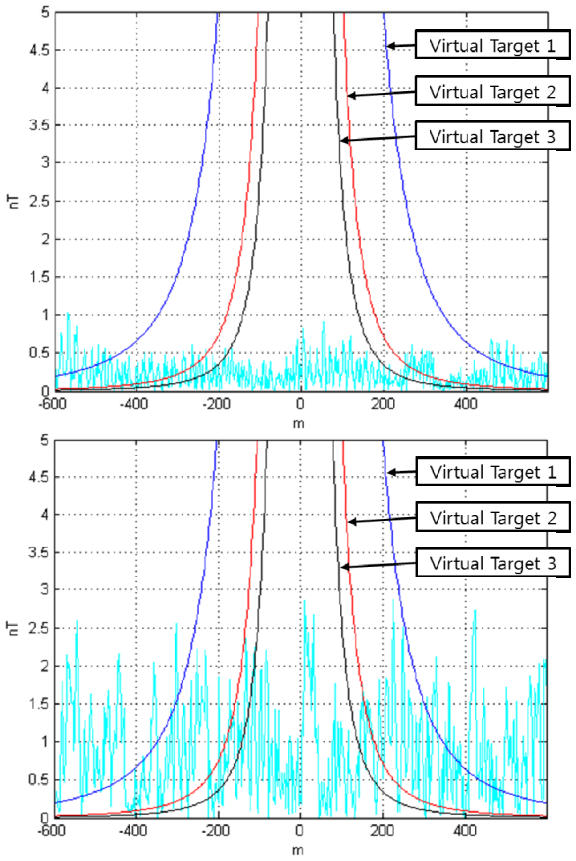


Fig. 10. Detection range prediction during the nighttime(top) and daytime(bottom)

동로에 따라 센서의 매설 수심과 표적의 기동수심이 결정된다. 또한 감시구역의 자기장 변화량에 따라 탐지 문턱치가 결정되고 감시하고자 하는 표적에 따라 함정에 의해 발생하는 자기장이 달라진다. 본 논문에서 측정한 OO항의 자기장은 전기철도의 영향으로 자기장의 변화가 상대적으로 크게 발생한다. 이러한 감시구역의 자기장 특성에 따라 적절한 탐지 문턱치의 설정이 필요하며 탐지 문턱치 1.5 nT와 3 nT는 OO항의 특성에 맞게 설정한 값으로 감시구역에 따라 변경되어야 한다.

4. 위치 추정

단일 센서를 설치한다면 표적의 출현 여부만 파악할 수 있다. 센서를 배열로 설치하면 표적의 위치를 확인

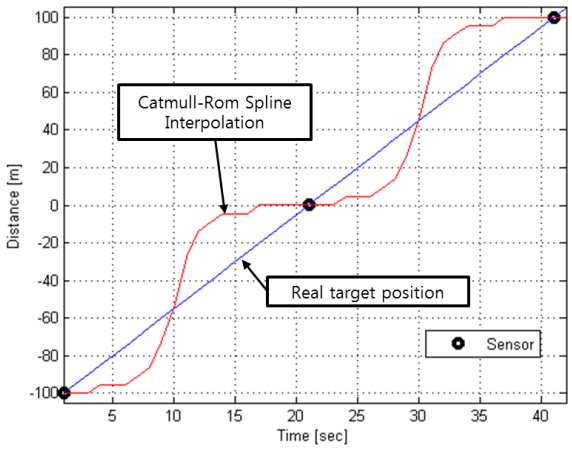


Fig. 11. Comparison of estimated position and real position

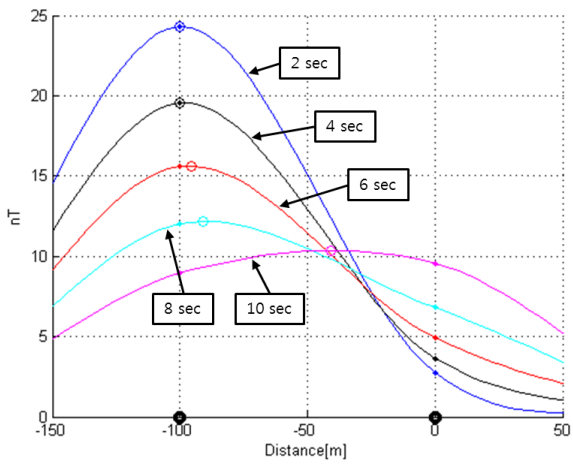


Fig. 12. Raw data and Catmull-Rom spline interpolation result

할 수 있으며, 인접한 센서 신호와의 보간(Interpolation)으로 센서와 센서 사이에 존재하는 표적의 위치를 보다 정밀하게 추정할 수 있다. 센서 배열을 2열로 설치하면 표적의 접근 방향도 확인이 가능하다. 본 논문에서는 표적의 위치를 추정하기 위하여 Catmull-Rom 스플라인 보간법을 사용하였다.

수중 가상 표적이 센서 배열을 따라 일정한 속도로 이동하여도 표적의 위치를 추정하게 되면 센서와 인접한 부근에서 천천히 이동하다 센서와 멀어지면 빨리 이동하는 것처럼 보이게 된다. 이와 같은 위치 추정 오차의 원인은 자기장의 감쇄 특성과 관련있다. Fig.

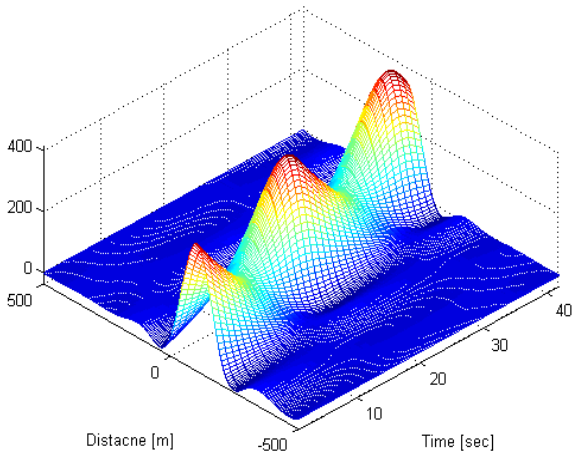


Fig. 13. Magnetic sensor signal strength by target position

12는 Fig. 11에서 2초부터 10초까지 2초 간격으로 센서에서 측정한 자기 신호(점)와 Catmull-Rom 스플라인 보간의 결과(실선) 그리고 추정된 표적의 위치에 해당하는 보간의 최대값(원)을 나타낸다. Fig. 13은 Fig. 11에서 Catmull-Rom 스플라인 보간을 3차원으로 표현한 것이다. Fig. 12와 Fig. 13에서와 같이 표적의 자기장 세기는 측정 위치로부터 멀어지면 급격하게 감소하고 가까워지면 급격하게 증가한다. 이러한 자기장의 감쇄 특성으로 보간 결과의 피크가 동일한 간격으로 생성되지 않아 표적은 동일한 속도로 이동하였으나 표적의 속도가 변하는 것처럼 보이게 된다.

5. 고 찰

본 논문은 함정의 파괴, 기뢰부설 및 정찰 등의 목적을 가지고 항만으로 침투하는 적 잠수함 세력을 감시하기 위하여 함정의 의해 발생하는 자기장을 이용하여 잠수함을 탐지하기 위한 연구의 결과이다. 감시구역의 지구자기장 특성을 파악하기 위해 OO항의 자기장을 측정하고 분석하였다. 탐지하고자 하는 표적의 특성을 설정하고 가상 표적에 의해 발생하는 자기장을 예측하였고, 표적의 가상 자기장 신호를 생성하여 예상되는 탐지거리를 분석하였다. 또한 지구자기장과 표적의 자기장 신호를 효과적으로 분리하기 위한 신호처리 기법을 제안하였다. 지수이동평균을 이용하여 지구자기장과 표적 신호를 분리하는 이 신호처리 기법은 계수의 변경만으로 다양한 자기장 환경에 적용이 가능하다는 장점을 갖는다.

본 연구에서는 지구자기장과 주변 환경에 의해 발생하는 자기장을 제거하지 않고 탐지거리를 예측하였다. 환경에 의한 자기장을 보다 효과적으로 제거한다면 탐지 문턱치를 낮출 수 있고 예측한 탐지거리의 향상을 기대할 수 있다[8]. 또한 표적에 의해 발생하는 자기장의 세기를 예측하기 위한 잠수함의 다이폴 모멘트를 보다 정교하게 설정하기 위한 연구가 추가로 수행되어야 한다.

References

[1] Chang-Seob Yang, Hyun-Ju Chung, Hye-Sun Ju, and Jae-Jin Jeon, “Prediction for Underwater Static Magnetic Field Signature Generated by Hull and Internal Structure for Ferromagnetic Ship,” Journal of Korea Magnetics Society, Vol. 21, No. 5, pp. 167-173, 2011.

[2] Chang-Seob Yang, Hyun-Ju Chung, “Study on Analysis Method for Ship’s Ferromagnetic Signature using Magnetic Mock-up Model,” Journal of the KIMST, Vol. 10, No. 4, pp. 38-51, 2007.

[3] Hwiseok Kim, Seonho Lim, Jaewon Doh, “The Magnetic Treatment Method for Low-Observable Naval Vessel,” Journal of the Korean Magnetics Society, Vol. 24, No. 4, pp. 128-133, 2014.

[4] Chang-Seob Yang, and Hyun-Ju Chung, “A Study on Dipole Modeling Method for Ship’s Magnetic Anomaly using Singular Value Decomposition Technique,” Journal of Korea Magnetics Society, Vol. 17, No. 6, pp. 259-264, 2007.

[5] J. Watermann, J. Lam, “Distrubutions of Magnetic Field Variations, Differences and Residuals,” SACLANT Undersea Research Centre, Italy, pp. 1-10, 1999.

[6] Arie Sheinker, Lev Frumkis, Boris Ginzburg, Nizan Salomonski, Ben-Zion Kaplan, “Magnetic Anomaly Detection Using a Three-Axis Magnetometer,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 1, pp. 160-167, 2009.

[7] Arie Sheinker, Nizan Salomonski, Boris Ginzburg,

Lev Frumkis, Ben-Zion Kaplan, “Magnetic Anomaly Detection using Entropy Filter,” Measurement Science and Technology, Vol. 19, pp. 1-5, 2008.

[8] Arie Sheinker, Boaz Lerner, Nizan Salomonski, Boris Ginzburg, Lev Frumkis, Ben-Zion Kaplan, “Localization and Magnetic Moment Estimation of a Ferromagnetic Target by Simulated Annealing,” Measurement Science and Technology, Vol. 18, pp. 3451-3457, 2007.