

함정에서 발생하는 자계신호의 성분분리에 대한 검토

김영학^{1*} · 도재원²

Investigation on the component separation of magnetic signal generated from a ferro-magnetic vessel

Young-Hak Kim^{1*} · JaeWon Doh²

^{1*}Department of Electrical Engineering, Pukyong University, Pusan 608-737 Korea

²Maritime R&D Lab. LIGNex1 Co., Ltd Seongnam, Gyeonggi-do, 463-400, Korea

요 약

함정의 탈자결과 평가를 위한 자계신호의 분리방법에 대한 이론적 근거와 해저 면에 설치되는 사각코일로부터 발생하는 불균일한 자계가 분리결과에 미치는 영향을 측정 신호와 FEM 해석을 통해 검토하였다. 측정신호는 제작된 모델함에서 발생하는 자계를 자계센서로 측정된 것이며 FEM 계산은 제작된 모델함과 동일한 형상으로 수행되었다. ILM(induced longitudinal magnetization) 신호와 IVM(induced vertical magnetization) 신호는 함정이 가지는 투자율과 지자계의 수평과 수직방향 성분에 의해 각각 발생하는 자화에 의한 것이며, PLM(permanent longitudinal magnetization) 신호와 PVM(permanent vertical magnetization) 신호는 함정의 영구자화의 수평성분과 수직성분에 의한 것임이 확인되었다. 또한 사각 코일의 수직방향의 자계는 균일한 지자계를 완전히 상쇄할 수 없어 사각코일의 면적에 가까운 크기를 가지는 함정 일수록 사각코일의 자계 불균일성의 영향을 크게 받게 됨을 알았다.

ABSTRACT

This paper investigated the separation of magnetic signal from a ferro-magnetic object. The magnetic signals were ILM(induced longitudinal magnetization) and IVM(induced vertical magnetization), which were induced by earth magnetic field and PLM(permanent longitudinal magnetization) and PVM(permanent vertical magnetization), which were due to a permanent magnetization of the object, respectively. Magnetic signal separation was based on the fact that magnetization vector could be analyzed according to longitudinal and vertical directions. Also the influence of non-uniform magnetic field from a rectangular coil on the separation was examined. A military vessel with a size close to rectangular coil has more errors on the magnetic signal separation.

키워드 : 자화성분분리, 자기신호, 지자계, 함정

Key word : magnetic component separation, magnetic signal, earth magnetic field, military vessel

접수일자 : 2014. 05. 09 심사완료일자 : 2014. 06. 10 게재확정일자 : 2014. 06. 20

* **Corresponding Author** Young-Hak Kim (E-mail:kimyh@pknu.ac.kr, Tel:+82-51-629-6316)

Department of Electrical Engineering, Pukyong University, Korea 608-737, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.8.2051>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

투자율과 잔류자화를 가지는 합정과 같은 강자성체가 지자계에 노출될 때, 투자율과 잔류자화에 비례하여 자계를 발생시킨다. 수중기뢰는 강자성체의 선체에 의해 발생하는 자계를 탐지하므로 합정의 생존성을 보장하기 위해서는 최대한 발생자계를 억제해야 한다. 이를 위해 소자와 탈자와 같은 자기처리 기술이 연구되어 왔다[1-4]. 이 중, 탈자는 지자계가 균일한 해상에서 정해진 절차에 따라 실시되며[5] 탈자 후 합정으로부터 발생하는 자계신호를 성분별로 분리[6]하여 탈자결과를 평가한다. 이를 위해 먼저 합정을 해저에 설치된 사각코일 바로 윗 수면에 지자계의 수평방향(자북-자남)으로 합정의 선수 또는 선미를 배치한다. 다음에 합정에서 발생하는 자계신호를 해저에 설치된 자계센서로 측정한다. 후, 다시 합정선수의 방향을 바꾸어 자계신호를 측정한다. 이것을 턴십(turn ship: 선수 또는 선미의 방향을 남-북으로 한번, 북-남방향으로 바꾼는 것)에 의한 측정이라 한다. 마지막으로 사각코일로 합정 높이 중심부에서 지자계의 수직성분을 상쇄시킨 후, 합정에서 발생하는 자계신호를 다시 측정하며 총 세 번에 걸쳐 자계신호를 측정한다. 측정된 신호는 연산을 통해 합정의 길이방향(지자계의 수평성분 방향), 상하방향(지자계의 수직성분 방향) 별로 영구자화에 의한 신호와 지자계에 의한 유도자화 신호로 분리한다. 이 때 연산에서는 영구자화에 의한 신호는 유도자화에 의한 신호와 동일한 모양을 가지는 것을 가정하고 있다. 그러나 이런 분리 방법의 타당성을 확인하기 위해서는 다음을 확인할 필요가 있다.

첫째는 분리된 자계신호가 복잡한 형상을 가지는 선체에서 방향별로 분해된 자화에 의한 것인가 이며 둘째는 영구자화에 의한 신호가 유도자화의 모양을 따르는가이다. 그리고 균일한 수직방향의 지자계를 사각코일에서 발생하는 불균일한 자계로 상쇄시킬 때 자화분리에 미치는 영향이다. 실제로 해군에서는 위와 같은 자화분리 방법으로 탈자결과를 평가하지만 이에 대한 물리적 근거에 대해서는 아직 보고된 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 자화분리의 이론적 근거와 사각코일의 불균일한 자계의 영향을 측정 신호와 FEM해석을 통해 검토하였다.

II. 본 론

2.1. 자화분리 방법

그림 1은 합정을 지자계 내에서 턴십(모델합의 하였을 때 합정의 자화성분의 변화를 나타낸 것이다. 그림과 같이 턴십에 의해 ILM(induced longitudinal magnetization)과 IVM(induced vertical magnetization)은 지자계의 방향이 바뀌지 않으므로 동일한 방향을 가진다. 그리고 PVM(permanent vertical magnetization)은 턴십을 하더라도 자화방향이 바뀌지 않지만 PLM(permanent longitudinal magnetization)의 방향이 바뀌게 된다. 여기서 ILM은 지자계의 수평방향성분에 의해 유도되는 합정의 길이방향의 자화성분이고 PLM은 지자계와 상관없이 합정의 길이방향 영구자화성분이다. IVM은 지자계의 수직방향 성분에 의해 합정의 상하방향으로 유도되는 자화성분이고, PVM은 합정의 상하방향의 영구자화성분이다.

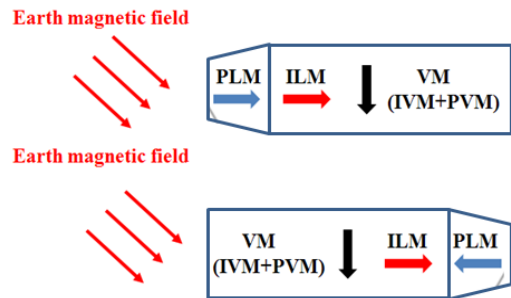


그림 1. 턴십에 의한 자화성분 변화
Fig. 1 magnetization change due to turn ship

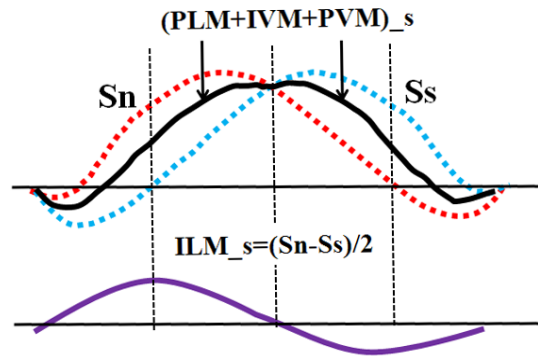


그림 2. 자계신호의 분리
Fig. 2 magnetic signal separation

따라서 턴삽을 하면 방향이 바뀌는 PLM의 크기에 따라 측정되는 자계신호는 달라진다. 그림 2는 ILM과 PLM, IVM, PVM에 의한 신호들의 성분분리를 설명하기 위한 모식도이다. 그림에서 Sn과 Ss는 턴삽에 의해 측정된 자계신호로 Sn은 선수가 북쪽, Ss는 선수가 남쪽일 때의 자계신호이다. ILM신호는 Sn(ILM+PLM+IVM+PVM)신호와 Ss(ILM-PLM+PIVM+PVM)신호를 식(1)에 대입하여 구할 수 있다. IVM은 식(2)를 이용해서 구한다.

$$ILM_s = (S_n - S_s) / 2 \quad (1)$$

$$IVM_s = (S_n - S_{n_loop}) \quad (2)$$

즉, 사각코일에 전류를 흘려 수직방향의 지자계를 상쇄시키면 IVM이 제거되므로 이 상태에서 Sn_loop(사각코일 자계가 있을 때의 Sn)를 측정하면 ILM+PLM+PVM의 신호가 얻어진다. 이 신호와 Sn 신호를 감산하면 IVM신호가 얻어진다. PVM신호는 PVM신호로부터 구한다. 이 때, PVM신호가 IVM신호와 크기는 다르지만 신호의 모양은 같다는 가정이 필요하다. 이것은 함정의 영구자화는 지자계에 의해 축척된다는 것을 의미하며 PLM과 ILM의 신호에도 같이 적용된다. 그림 2에서와 같이 Sn과 Ss가 교차하는 지점에서는 ILM 신호가 0이 되며 앞의 가정에 따라, PLM 신호도 역시 0이 된다. 이 교차하는 지점의 자계는 VM 신호, 즉, PVM+IVM 신호가 된다. 이 교차점에 센서를 두고 사각코일로 지자계를 상쇄시키면 IVM 신호가 0이 되므로 이 지점에서의 PVM의 신호의 크기가 구해진다. 이 지점의 PVM 신호와 IVM 신호의 비, alpha를 구할 수 있으므로 PVM의 신호는 다음 식과 같이 alpha를 IVM 신호에 곱하면 구할 수 있다.

$$PVM_s = \alpha \times IVM_s \quad (3)$$

이제 ILM_s와 IVM_s, PVM_s가 모두 구해졌으므로 이 신호들을 Sn신호와 감산을 하면 식(4)과 같이 PLM 신호가 구해진다. 음 식과 같이 구할 수 있다.

$$PLM_s = S_n - (ILM + IVM + PVM)_s \quad (4)$$

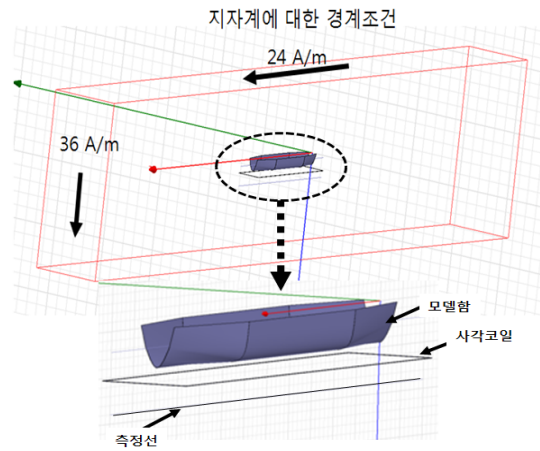


그림 3. FEM 해석모델
Fig. 3 FEM Analysis Model

이런 계산과정을 통해 측정된 Sn신호로부터 Ss, Sn_loop을 이용하여 ILM과 IVM, PVM, PLM의 4가지 신호가 순차적으로 분리된다.

2.2. FEM모델을 이용한 자화분리

FEM해석에서는 그림 3의 해석모델을 이용하였다. 이 모델에서 지자계는 경계면에 수직과 수평으로 자계를 입력하여 설정할 수 있다. 그리고 모델함의 물성치로써 등방성 투자율과 수평 및 수직 방향으로 각각 자화를 설정할 수 있다. 자화분리를 위한 FEM해석은 다음 세 가지 경우로 나누어 수행되었다. 첫 번째 경우는 ILM과 IVM, PLM, PVM에 의한 신호를 각각 독립적으로 구하는 것이다. ILM 신호를 구할 때에는 모델함에 투자율만을 입력한 지자계의 수평방향성분만을 인가하며, IVM 신호는 수직방향의 지자계만을 설정하여 각각 계산하였다. PLM 신호는 수평방향으로, PVM 신호는 수직방향으로만 입력하여 계산하였다. 단, 이 때, 지자계는 설정되지 않는다. 이 계산으로 ILM, PLM, IVM, PVM 신호들을 각각 독립적으로 구할 수 있다. 두 번째 경우는 앞에서 설명한 자화분리 방법을 이용하는 것이다. 이 경우 IVM 신호를 구할 때, 사각코일을 사용하지 않고 수직방향의 지자계를 설정하지 않았다. 세 번째의 경우는 사각 코일을 사용하여 코일에서 발생하는 불균일한 수직자계가 균일한 지자계의 수직성분을 보상시켜 계산하였다. 이 계산을 통해 사각코일의 자계가 지자계의 수직성분을 완전히 상쇄하는 지 확인할 수 있다.

III. 실험 결과

그림 4는 실제 제작한 모델함에서 발생하는 자계를 측정하고 계산한 것을 나타낸 것이다. 측정치는 모델함을 텅텅하여 측정한 것이고 계산치는 다수의 투자율과 수직 및 수평자화를 FEM 모델에 입력하여 얻어진 S_n 이 측정된 S_n 신호가 되도록 피팅하였다.

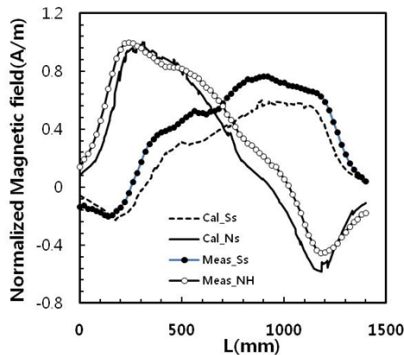


그림 4. 측정된 자기신호와 계산된 자기신호
Fig. 4 Measured and calculated magnetic signals

그리고 그림에서와 같이 S_s 의 계산치는 S_n 으로부터 구한 투자율과 자화값을 입력한 상태에서 모델함의 방향을 바꾸어 계산된 것으로 실측치와 오차가 존재하였다. 그리고 FEM 모델에서는 실제 모델함의 두께, 0.15mm로 계산이 어려워 두께를 1mm로 하여 계산하였기 때문에 실측치와 계산치의 발생자계의 크기가 다르다. 따라서 각각을 최대치로 규준화하여 신호의 모양을 맞추었다. 표 1은 그림 4의 S_n 피팅을 위해 입력한 투자율과 자화를 나타낸 것이다. 이 표에서 #1-#3은 선수 부분과 중앙부분, 선미부분을 각각 나타낸 것으로 실제 제작한 모델함도 동일하게 나누어져 있다. 이후 나오는 세 가지 자화분리의 계산결과에는 표 1의 투자율과 자화가 이용되었다. 그림 5는 자화분리에 대한 첫 번째 경우와 두 번째 경우의 계산결과를 나타낸 것이다. 그림(a)-(d)에서와 같이 ILM, IVM, PVM, PLM의 신호가 두 경우 모두 동일하였다. 이것은 ILM과 IVM은 투자율을 가지는 함정에 지자계의 수평방향성분과 수직방향성분에 의해 각각 발생하는 것이며 PLM과 PVM은 함정이 가지는 영구자화의 수평과 수직방향 성분에 의해 발생하는 것을 의미한다.

표 1. FEM 해석에 적용된 자화와 투자율.

Table. 1 magnetizations and permeabilities for FEM analysis

	#1	#2	#3	기타
투자율	180	200	200	유도자화성분
수직자화 (A/m)	0.0012	0.004	0.0016	영구자화성분
수평자화 (A/m)	-0.0018	-0.001	-0.0004	

또한 자화분리에서 가정된 것과 같이 영구자화의 모양은 유도자화의 모양을 따른다는 것이 확인되었다. 표 2는 ILM의 크기가 거의 0인 지점에서 PVM의 신호와 IVM의 신호, 그리고 그 비인 α 를 구한 것이다. ILM이 0에 가까운 지점은 거의 함정의 길이방향에 있어서 정중앙이며 S_n 과 S_s 가 교차하는 지점이었다. 이 지점에서 구한 PVM과 IVM 신호의 비인 α 는 0.1875였고 이 값이 그림 5(b)에서 보인 IVM 신호에 곱해서 그림 5(c)의 PVM 신호가 구해졌다. 그림 6은 자화분리의 두 번째와 세 번째 경우를 비교한 것이다. 그림 6(a)와 같이 ILM 신호는 두 경우 모두 일치하였다. 그러나 그림 6(b)에서와 같이 IVM 더 크게 나타났다. 그림 6(c)의 PVM 비교에서는 두 경우 모두 일치하는 것은 IVM에 곱해지는 α 가 매우 작아 그래프 상에는 차이가 나타나지 않았다.

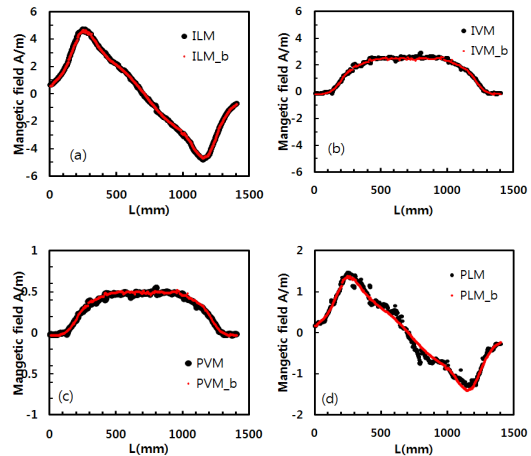


그림 5. 균일 지자계 공간에서 분리된 신호의 비교
Fig. 5 comparison of separated signals under earth magnetic field.

표 2. 균일 지자계공간에서 IVM과 PVM의 비
Table. 2 Ratio of IVM to PVM under earth magnetic field

position (mm)	IVM (A/m)	PVM (A/m)	alpha
697	2.6207	0.4913	0.1875

표 3. 불균일 지자계공간에서 IVM과 PVM의 비
Table. 3 Ratio of IVM to PVM under earth magnetic field and z coil field

position (mm)	IVM (A/m)	PVM (A/m)	alpha
705	3.5783	0.4984	0.1393

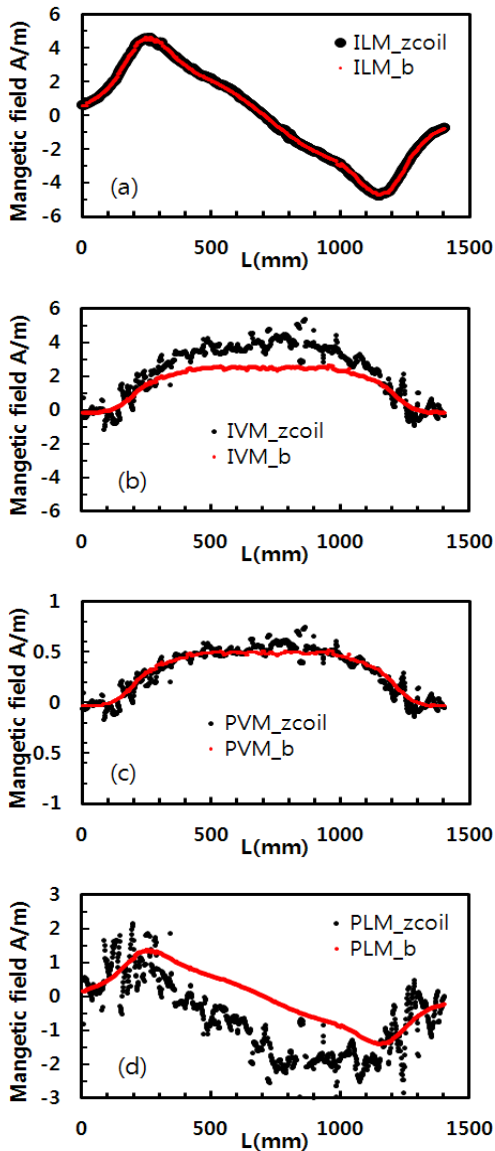


그림 6. 불균일 지자계 공간에서 분리된 신호의 비교
Fig. 6 comparison of separated signals under earth magnetic field and z coil field.

최종적으로 구해지는 PLM의 비교에서는 두 경우의 차이가 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 사각코일의 자계가 함정 높이 중심에서 지자계의 수직성분을 상쇄시킬 수 있지만 함정 전체에 있어서 수직방향의 지자계를 완전히 상쇄하지 못함을 알 수 있다. 표 2는 표 1과 같이 ILM이 0이 가까운 지점에서 alpha를 계산한 것으로 표 1과 같이 ILM이 0이 되는 지점은 표 1과 같이 함정 길이 거의 중앙부분에 위치함을 알 수 있다.

IV. 결론

해군의 탈자결과 평가를 위한 자계신호의 분리방법에 대한 이론적 근거와 해저 면에 설치되는 사각코일로부터 발생하는 불균일한 자계의 영향을 측정 신호와 FEM해석을 통해 검토하였다. 본 논문에서 얻은 주요 결과는 아래와 같다.

- (1) ILM 신호와 IVM 신호는 함정이 가지는 투자율과 지자계의 수평과 수직방향 성분에 의해 발생하는 자화에 의한 것이다.
- (2) PLM 신호와 PVM 신호는 함정의 영구자화의 수평 성분과 수직성분에 의한 것이다.
- (3) 지자계의 수직방향성분을 상쇄하기 위한 z코일의 수직방향의 자계가 불균일하여 균일한 지자계를 완전히 상쇄할 수 없다.

함정에서 발생하는 자계신호를 수직 및 수평 방향으로 분리할 수 있는 것은 복잡한 함정의 형상에 분포하는 자화벡터를 수평 및 수직방향으로 분해된 자화의 합으로 표현할 수 있기 때문이다. 그리고 사각코일의 면적에 가까운 크기를 가지는 대형함 일수록 사각코일의 자계불균일성의 영향을 크게 받게 됨을 알았다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2014년)에 의하여 연구되었음

REFERENCES

- [1] Y. Vuillermet¹, O. Chadebec¹, J.-L. Coulomb¹, L.-L. Rouve, G. Cauffet¹, J. P. Bongiraud¹, and L. Demilier, "Scalar Potential Formulation and Inverse Problem Applied to Thin Magnetic Sheets," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 6, pp. 1054-1057, June. 2008.
- [2] A. Vishnevski, I. Krasnov, and A. Lapokov, "Calculation of static magnetization for thin-walled constructions by boundary element method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, no. 5, pp. 2152 - 2155, Sep. 1993.
- [3] O. Chadebec, J. L. Coulomb, J. P. Bongiraud, G. Cauffet, and P.Le Thiec, "Recent improvements for solving inverse magnetostatic problem applied to thin hulls," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 2, pp. 1005 - 1008, Mar. 2002.
- [4] Ki-Chan Kim, Kwan-Seob Yoon, Chang-Seob Yang, Kwang-Ho Shin, Hae-Yong Jeong, and Young-Hak Kim, "Remnant Magnetization Prediction in the Demagnetization Process by Orthogonal Magnetic Field," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no.10, pp. 4360 - 4364, October 2011.
- [5] T. M. Baynes, G. J. Russell, and A. Bailey, "Comparison of Stepwise Demagnetization Techniques," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no.4, pp. 4360 - 4364, July 2002.
- [6] C. S. Yang and H. J. Jung, "Study on analysis method for ship's ferromagnetic signature using magnetic mock-up model," *J. KIMST*, vol. 10, pp 38-51, 2007.



김영학(Young-Hak Kim)

1986년 부산수산대학 전자통신공학과 공학사
1991년 일본동북대학 전자공학과 공학석사
1994년 일본동북대학 전자공학과 공학박사
※관심분야: 센서네트워크 국방과학



도재원(JaeWon Doh)

1990년 한양대학교 지구해양과학과 공학사
1992년 한양대학교 지구해양과학과 공학석사
※관심분야: 수중신호처리 국방과학