

총체적 선체자장에 관한 연구

정 태 권* · 이 상 집**

A Study on the Overall Ship's Magnetism

Tae-Gweon, Jeong · Sang-Jib, Lee

〈 목 차 〉

Abstract

1. 서 론

2. 총체적 선체자장의 모델

3. 선체자장의 실측

4. 결과 및 고찰

5. 결 론

참고문헌

Abstract

The ship's magnetic compass even if corrected is feasible to indicate the erroneous information due to the change of the ship's magnetism. But if the north-seeking sensor of the transmitting magnetic compass system is located where the effect of the ship's magnetism is the least, that problem is expected to be removed.

In this paper, as a basic research to enhance the accuracy and the stability of the ship's magnetic compass by placing the north-seeking sensor at the adequate location, the theoretical model for the overall ship's magnetism were studied from the macroscopic viewpoint. The parameters of the theoretical model were determined by the least square method on the assumption that the overall magnetism of a ship can be regarded as that of the prolate spheroidal magnetic body. The agreement between the modelled and the observed values was found to be good.

1. 서 론

선박용 자기컴파스는 컴파스 주변에 배치되어 있는 수정용 자석으로 선체자장을 조정하는 자차

수정의 방법으로써 그 효용성이 유지된다. 이 자차수정기술은 프와송(Poisson)의 선체자장의 이론을 바탕으로 한 자차실용공식을 이용하는 것이지만, 실무에서 이 기술을 적용하더라도 여기에는

* 정희원, 한국해기연수원

** 정희원, 한국해양대학

몇 가지 문제점이 있기 때문에 선박의 현장에서 그때그때 보완 수정을 하지 않으면 콤파스로서의 효용성이 떨어져 사용할 수 없게 된다.¹⁾²⁾³⁾

그러나 최근에 개발된 원격지시식 자기콤파스⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾에서 그 콤파스 보울을 경미한 지북탐지기(north-seeking sensor)로 개량하고 이것을 지시기와 분리하여 선체자기의 영향이 약한 곳에 설치하면 이런 보완 수정 작업이 절감될 것이다. 그 점에 주목하여 선체자장의 특성에 관한 연구가 다소 이루어진 바가 있다. 선체자장의 실측치를 바탕으로 최소자승법과 약산법을 이용하여 총체적 선체자장의 모델을 개발한 바⁸⁾가 있고 또 선체를 하나의 편장회전타원체형 자성체(prolate spheroidal magnetic body)로 간주하고 그 내부 자장이 균일하다는 전제하에 편장회전타원체 주변의 자장에 관한 이론을 전개하여 내부 자장을 결정한 바⁹⁾가 있다. 그런데 전자의 경우에는 실측장소가 아닌 임의 위치에서 선체자기의 경향과 세기를 정확하게 예측할 수 없고 또 후자의 경우에는 내부 자장이 균일하지 않은 경우에는 그대로 사용할 수 없는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이런 문제점들을 보완하기 위하여 이와는 달리 편장회전타원체내의 장축상에 자기원(magnetic source)이 존재한다는 가정하에 그 내부 자화도¹⁰⁾를 결정하여 총체적 선체자장의 모델을 구성하고 그것을 토대로 편장회전타원체 주위의 자장을 시뮬레이션한 결과와 실측 선체자장을 비교하여 이 모델의 타당성과 효용성을 분석하기로 한다.

본 연구에서는 다음과 같은 전제하에 이론을 전개하였다.

1. 선체의 국부 구조물을 무시하고 선체를 편장회전타원체형 자성체로 간주한다.
2. 선체 외부의 자장은 편장회전타원체내의 장축상에 있는 자기원에 의한 자장으로 표시할 수 있는 것으로 한다.
3. 실측대상 선박은 3도형(三島型)으로 국한한다.

2. 총체적 선체자장의 모델

선체의 내부에서는 선체의 구조물로 인한 지자

기의 차단현상¹¹⁾¹²⁾으로 자기콤파스의 지북력이 떨어지며, 또 선박의 이동으로 자기위도가 크게 변하면 선체자장에 대한 자차수정구 수정량의 불균형¹³⁾으로 자차가 크게 되어 자기콤파스의 효용성이 크게 떨어진다. 그러므로 선체자장의 최소점은 선체의 외부에서 탐색되어야 할 것이다. 본 연구에서는 선체자장의 최소점을 탐색하는 기초연구로서 총체적 선체자장을 연구하기로 하며, 편의상 선체의 국부적인 구조물을 무시하고 선체를 하나의 편장회전타원체형 자성체로 보고 또 이 자성체의 외부 자장은 장축상의 축점 사이에 분포된 자기원에 의한 것이라는 전제하에 총체적 선체자장의 모델을 구성하기로 한다.¹⁴⁾

2. 1. 편장회전타원체의 자위(magnetic scalar potential)

선체의 길이를 2a, 폭을 2b로 하고 원점을 선체의 중심에 두고 선수미방향을 x축, 정횡방향을 y축, 수직방향을 z축으로 하여 편장회전타원체를 표시하는 방정식을 직각 좌표로 나타내면 식(1)과 같다.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2+z^2}{b^2} = 1 \dots\dots\dots(1)$$

식(1)을 축점(±c, 0, 0)인 편장회전타원체좌표로 변환하면 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} x &= cu = c\xi\eta \\ y &= cv = c\sqrt{(\xi^2-1)(1-\eta^2)}\cos\phi \\ z &= cw = c\sqrt{(\xi^2-1)(1-\eta^2)}\sin\phi \end{aligned} \dots\dots\dots(2)$$

단, $1 < \xi < \infty, -1 < \eta < 1, 0 \leq \phi \leq 2\pi$

또 ξ, η, ϕ 방향의 스케일 팩터(scale factor)를 각각 h_ξ, h_η, h_ϕ 라 하면 식(3)으로 표시된다.

$$\begin{aligned} h_\xi &= c\sqrt{(\xi^2-\eta^2)/(\xi^2-1)} \\ h_\eta &= c\sqrt{(\xi^2-\eta^2)/(1-\eta^2)} \\ h_\phi &= c\sqrt{(\xi^2-\eta^2) \cdot (1-\xi^2)} \end{aligned} \dots\dots\dots(3)$$

편장회전타원체의 외부에 있는 임의 점에서의 자위를 ψ 라 하면 이것은 식(4)와 같은 라플라스 방정식(Laplace's equation)을 만족한다.

$$\nabla^2\psi = \frac{1}{h_\xi h_\eta h_\phi} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{h_\eta h_\phi}{h_\xi} \right) \frac{\partial \psi}{\partial \xi} + \dots \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{h_x h_0}{h_n} \right) \frac{\partial \psi}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{h_x h_n}{h_0} \right) \frac{\partial \psi}{\partial \phi} = \frac{1}{c^2(\xi^2 - \eta^2)} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (\xi^2 - 1) \frac{\partial \psi}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \eta} (1 - \eta^2) \frac{\partial \psi}{\partial \eta} + \frac{(\xi^2 - 1) + (1 - \eta^2)}{(\xi^2 - 1) \cdot (1 - \eta^2)} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \right] = 0 \dots (4)$$

식(4)는 편장회전타원체 외부의 자위를 결정하는 방정식이다. 식(4)에서 자위 ψ 는 $\psi(\xi, \eta, \phi) = \Phi(\phi) \cdot X(\xi) \cdot Y(\eta)$ 와 같이 ϕ, ξ, η 만의 함수 Φ, X, Y 의 곱으로 표시될 수 있으므로 식(4)의 일반해 즉, 편장회전타원체 조화함수는 식(5)로 표시된다.¹⁵⁾

$$\psi(\xi, \eta, \phi) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n [A_{nm} \cos(m\phi) + B_{nm} \sin(m\phi)] \times P_n^m(\eta) \cdot Q_n^m(\xi) \dots (5)$$

식(5)는 편장회전타원체 외부의 자위를 나타내는 식이다. 조화계수 A_{nm} 및 B_{nm} 을 편장회전타원체의 장축상에 배열된 자기원으로 표현하고 이를 최소자승법으로 구하기로 한다.

2. 2. 편장회전타원체의 내부자화도

편장회전타원체형 자성체의 외부자장은 내부의 장축상에 배열되어 있는 자기원에 의한 것으로 간주할 수 있으므로 편장회전타원체 외부의 자위를 나타내는 조화계수는 장축상의 촛점과 촛점 사이에 분포된 자기원으로 표시할 수 있다.¹⁶⁾ 여기서는 이러한 자기원을 도입하여 편장회전타원체형 자성체 내부의 자화도 M , 방향 α, β 를 구하기로 한다.

2. 2. 1 자기원에 의한 자위

편장회전타원체 장축상의 두 촛점 사이에 있는 자기원의 자화도 M 은 식(6)으로 표시된다.

$$M = M(x'), \quad -c \leq x' \leq c \dots (6)$$

단, x' : 자기원의 x 좌표

디락 델타 함수(Dirac delta function)와 단위계단함수(unit step function)를 이용하여^{17) 18)} 편장회

전타원체 내부의 임의 위치벡터 R' 에 있는 자기원의 자화도 M 을 x, y, z 의 방향 성분으로 표시하면 식(7)과 같다.

$$M(R') = [M_x(x') i + M_y(x') j + M_z(x') k] \times [u_{-c}(x') - u_c(x')] \delta(y') \delta(z') \dots (7)$$

단, u_c, u_{-c} : 단위계단함수
 y', z' : 자기원의 y, z 좌표
 $\delta(y'), \delta(z')$: 디락 델타 함수

임의 위치벡터 R' 에 있는 자기원에 의한 편장회전타원체 외부에서의 자위 $\psi(R)$ 은 식(8)로 표시할 수 있다.^{19) 20) 21)}

$$\psi(R) = \frac{1}{4\pi} \int \frac{-\nabla' \cdot M(R')}{|R - R'|} dv' \dots (8)$$

단, ∇' : 자기원에서의 나블라(nabla) 연산자
 R : 편장회전타원체 외부에 있는 임의 위치벡터
 dv' : 자기원에서의 용적소(容積素)

식(8)의 용적적분의 적분구간을 식(9)와 같이 정한다.

$$\begin{aligned} -c - \varepsilon &\leq x' \leq c + \varepsilon \\ -\varepsilon &\leq y' \leq \varepsilon \dots (9) \\ -\varepsilon &\leq z' \leq \varepsilon \end{aligned}$$

단, ε 는 임의 양의 수
 $2c$ 는 편장회전타원체의 촛점 거리

식(8)에 식(7)을 대입하여 식(9)의 적분 구간에 따라 적분한 결과는 자화도 M 에 의한 자위가 된다. 그 x, y, z 방향 성분에 의한 자위를 각각 $\psi^x(R), \psi^y(R), \psi^z(R)$ 이라 하면 이들은 다음의 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \psi^x(R) = \frac{1}{4\pi} \int_{-c}^c \frac{-\frac{d}{dx'} [M_x(x')] dx'}{[(x-x')^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} \\ - \frac{M_x(-c)}{[(x+c)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} + \\ \frac{M_x(c)}{[(x-c)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} \dots (10) \end{aligned}$$

$$\psi'(R) = \frac{1}{4\pi} \int_{-c}^c \frac{M_y(x') y dx'}{[(x-x')^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} \dots (11)$$

$$\psi'(R) = \frac{1}{4\pi} \int_{-c}^c \frac{M_z(x') z dx'}{[(x-x')^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} \dots\dots (12)$$

2.2.2 편장회전타원체의 조화함수와 내부자화도

식(10)-(12)와 방정식 (5)와의 관계는 하브록(T. H. Havelock)에 의하여 밝혀졌다. 그는 편장회전 타원체 조화함수를 편장회전타원체의 두 축점 사이의 장축상에 분포된 특이점 즉, 자기원으로 표현하는 방법을 개발하였다.²²⁾ 이 하브록의 공식을 이용하여 밀로(Touvia Miloh)는 다음과 결과식을 유도하였다.²³⁾

$$P_n^m(\eta) Q_n^m(\xi) e^{im\phi} = \frac{(-1)^m (2m)!}{2^{m+1} m!} \times \int_{-1}^1 \frac{(1^2 - t^2)^{m/2} P_n^m(t) (v + iw)^m dt}{[(u-t)^2 + v^2 + w^2]^{m+1/2}} \dots (13)$$

식(13)은 축점의 좌표가 직각좌표로 $(\pm 1, 0, 0)$ 인 편장회전타원체좌표에 적용된다. 이 식의 좌변은 편장회전타원체 조화함수로 표시된 타원체의 외부 자위이고 우변은 편장회전타원체의 장축상에 분포된 자기원에 의한 외부 자위이다. 닉슨(D. A. Nixon)과 베이커(F. E. Baker)는 식(2)와 $t = x'/c$ 을 식(13)에 대입하여 축점의 좌표가 $(\pm c, 0, 0)$ 인 경우도 사용할 수 있는 식(14)와 같은 개량된 하브록 공식을 개발하였다.²⁴⁾

$$P_n^m(\eta) Q_n^m(\xi) e^{im\phi} = \frac{(-1)^m (2m)!}{2^{m+1} m!} \times \int_{-c}^c \frac{(c^2 - x'^2)^{m/2} P_n^m(x'/c) (y + iz)^m dx'}{[(x-x')^2 + y^2 + z^2]^{m+1/2}} \dots (14)$$

식(14)로써 편장회전타원체 조화함수를 편장회전타원체 내부의 장축상에 분포되어 있는 자기원으로 표시할 수 있다. 즉, 식(14)를 식(5)에 대입하고 $1/4\pi$ 를 곱하여 식(10)-식(12)와 비교하여 보면 m 은 0 또는 1이 됨을 알 수 있으며 또 $M_x(-c) = M_x(c) = 0$ 인 조건을 부과하면 다음과 같은

일반식을 얻을 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \frac{1}{2c} \frac{A_{n0}}{n(n+1)} (c^2 - x'^2) \frac{dP_n^0(x'/c)}{d(x'/c)} \\ M_y &= -\frac{A_{n1}}{2} (c^2 - x'^2)^{1/2} P_n^1(x'/c) \\ M_z &= -\frac{B_{n1}}{2} (c^2 - x'^2)^{1/2} P_n^1(x'/c) \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

상기 식(15)은 x' 이 $-c \sim +c$ 로 변할 때 x, y, z 방향의 자화성분 M_x, M_y, M_z 를 나타내고 있으므로 각 방향의 평균 자화를 각각 $\bar{M}_x, \bar{M}_y, \bar{M}_z$ 로 나타내면 이들은 다음의 식으로 표시될 수 있다.²⁵⁾

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_x &= \frac{1}{2c} \int_{-c}^c M_x dx' \\ \bar{M}_y &= \frac{1}{2c} \int_{-c}^c M_y dx' \\ \bar{M}_z &= \frac{1}{2c} \int_{-c}^c M_z dx' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

자화도의 세기를 M , 방향을 β, α 라 하면 이들은 식(17)로 표현될 수 있다.²⁶⁾

$$\begin{aligned} M &= (\bar{M}_x^2 + \bar{M}_y^2 + \bar{M}_z^2)^{1/2} \\ \tan \beta &= (\bar{M}_y^2 + \bar{M}_z^2)^{1/2} / \bar{M}_x \dots\dots\dots(17) \\ \tan \alpha &= \bar{M}_z / \bar{M}_y \end{aligned}$$

식(17)을 이용하여 자기원이 장축상에 분포된 편장회전타원체 내부의 자화도와 자화방향을 구할 수 있다.

2.2.3 편장회전타원체의 조화계수에 관한 수치해석

식(15)에서 A_{n0}, A_{n1}, B_{n1} 은 편장회전타원체의 조화계수이다. 그런데 n 이 2이상일 때는 M_x, M_y, M_z 가 기함수가 되므로 식(16)의 $\bar{M}_x, \bar{M}_y, \bar{M}_z$ 는 모두 0이 된다. $n=1$ 로 하여 식(5)를 전개하면 식(18)과 같다.

$$\psi(\xi, \eta, \phi) = A_{10}P_1^0(\eta)Q_1^0(\xi) + (A_{11}\cos \phi + B_{11}\sin \phi) \times P_1^1(\eta) Q_1^1(\xi) \dots (18)$$

또, $n=1$ 을 식(15)에 대입하여 식(16)을 정리하고 식(17)을 이용하여 자화도의 세기 M 과 그 방향 β , α 를 구한 결과는 식(19)와 같다.

$$\left. \begin{aligned} M &= (c/2k) (A_{10}^2/4 + A_{11}^2 + B_{11}^2)^{1/2} \\ \tan \beta &= 2(A_{11}^2 + B_{11}^2)^{1/2}/A_{10}^2 \\ \tan \alpha &= A_{11}/B_{11} \end{aligned} \right\} \dots (19)$$

식(19)를 조화계수 A_{10} , A_{11} , B_{11} 으로 표현하면 식(20)과 같다.

$$\left. \begin{aligned} A_{10} &= (4kM/c) \cos \beta \\ A_{11} &= (2kM/c) \cos \alpha \sin \beta \\ B_{11} &= (2kM/c) \sin \alpha \cos \beta \end{aligned} \right\} \dots (20)$$

한편, $H = -\nabla\psi$ 이므로 H 의 ξ, η, ϕ 방향의 자장 성분을 H_ξ , H_η , H_ϕ 라 하고 이들을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H_\xi &= -\frac{1}{h_\xi} \frac{\partial \xi}{\partial \xi} \\ &= -\frac{2kM}{c^2} \frac{\sqrt{\xi^2-1}}{\sqrt{\xi^2-\eta^2}} \left\{ \frac{2\eta}{\xi} \left[Q_1^0(\xi) - \frac{1}{\xi^2-1} \right] \cos\beta + \frac{\sqrt{1-\eta^2}}{\xi^2-1} \left[\xi Q_1^1(\xi) - \frac{2}{\sqrt{\xi^2-1}} \right] \times \sin\beta (\cos\alpha \cos\phi + \sin\alpha \sin\phi) \right\} \end{aligned} \dots (21)$$

$$\begin{aligned} H_\eta &= -\frac{1}{h_\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \\ &= -\frac{2kM}{c^2} \frac{\sqrt{1-\eta^2}}{\sqrt{\xi^2-\eta^2}} \left\{ 2 Q_1^0(\xi) \cos\beta - \frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} Q_1^1(\xi) \sin\beta \cos(\alpha-\phi) \right\} \end{aligned} \dots (22)$$

$$\begin{aligned} H_\phi &= -\frac{1}{h_\phi} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} = -\frac{2kM}{c^2 \sqrt{\xi^2-1}} Q_1^1(\xi) \\ &\quad \times \sin\beta \sin(\alpha-\phi) \dots (23) \end{aligned}$$

식(21), (22), (23)의 각 성분으로부터 합성자장의 세기 $H(\xi, \eta, \phi)$ 는 식(24)로 표시된다.

$$H(\xi, \eta, \phi) = (H_\xi^2 + H_\eta^2 + H_\phi^2)^{1/2} \dots (24)$$

식(24)를 이용하면 자속밀도 B 는 식(25)로 된다.

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 H \text{ (Tesla)} \\ &= \frac{4\pi}{10^3} H \text{ (Gauss)} \dots (25) \end{aligned}$$

여기서 식(25)를 가지고 직접 관측방정식을 만들어서 그것으로부터 최소자승법에 의하여 편장 회전타원체의 자화도 M 과 방향 β , α 를 구하기로 한다. 계산 편의상 식(25)의 양변에 $1000/4\pi$ 을 곱한 후 양변을 제곱하여 n 개의 관측방정식을 구성하면 식(26)이 된다.

$$\left. \begin{aligned} f^2(\xi_1, \eta_1, \phi_1) &= H_\xi^2(\xi_1, \eta_1, \phi_1) + H_\eta^2(\xi_1, \eta_1, \phi_1) + H_\phi^2(\xi_1, \eta_1, \phi_1) \\ f^2(\xi_2, \eta_2, \phi_2) &= H_\xi^2(\xi_2, \eta_2, \phi_2) + H_\eta^2(\xi_2, \eta_2, \phi_2) + H_\phi^2(\xi_2, \eta_2, \phi_2) \\ f^2(\xi_n, \eta_n, \phi_n) &= H_\xi^2(\xi_n, \eta_n, \phi_n) + H_\eta^2(\xi_n, \eta_n, \phi_n) + H_\phi^2(\xi_n, \eta_n, \phi_n) \end{aligned} \right\} \dots (26)$$

단, $f(\xi, \eta, \phi) = \frac{1000B}{4\pi}$

식(26)의 좌변은 실측선체자장을 제곱한 값이고 우변은 임의 측정위치에 대하여 식(20)으로써 얻어진 값이다. 우변을 보면 H_ξ, H_η, H_ϕ 가 2차식으로 나타나 있어 비선형이다. 본논문에서 자화도 M 과 방향 β , α 를 결정하기 위한 알고리즘은 포웰(Powell)의 하이브리드법을 사용하였다.^{27) 28)}

이때 사용한 수식은 아래와 같다. 목적함수를 $Z(M, \beta, \alpha)$ 라 하고, M, β, α 에 대한 목적함수 Z 의 편미분을 각각 $\frac{\partial Z}{\partial M}, \frac{\partial Z}{\partial \beta}, \frac{\partial Z}{\partial \alpha}$ 라 하면 식(27)로 표시된다.

$$\begin{aligned} Z(M, \beta, \alpha) &= \sum_{i=1}^n [H^2(\xi_i, \eta_i, \phi_i) - f(\xi_i, \eta_i, \phi_i)]^2 \\ \frac{\partial Z}{\partial M} &= 2 \sum_{i=1}^n [H^2(\xi_i, \eta_i, \phi_i) - f(\xi_i, \eta_i, \phi_i)] \frac{\partial H^2}{\partial M} \\ \frac{\partial Z}{\partial \beta} &= 2 \sum_{i=1}^n [H^2(\xi_i, \eta_i, \phi_i) - f(\xi_i, \eta_i, \phi_i)] \frac{\partial H^2}{\partial \beta} \end{aligned} \dots (27)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \alpha} = 2 \sum_{i=1}^n [H^2(\xi_i, \eta_i, \phi_i) - f(\xi_i, \xi_i, \phi_i)] \frac{\partial H^2}{\partial \alpha}$$

이 식(27)을 이용하여 자화도 M과 방향 β, α 를 구한다.

3. 선체자장의 실측

3.1 실험대상 선박

실험에 사용된 선박의 요목은 Table 1과 같다.

Table 1. The principal particulars, ship's headings and positions of the experimental vessels.

Ship's name	HANBADA	YUDAL	BUSAN-851	BUSAN-205
Length(LBP) (m)	90	86	66	57
Breadth (m)	15.5	15.0	11.4	9.8
Depth (m)	7.0	7.2	7.3	3.5
Gross tonnage	3492.0	3288.5	1126.5	500.0
Draft (m)	4.10	3.50	3.50	3.00
Ship's heading	036°	315°	052°	006°
Location lat.	35° 04.4'N	34° 47.2'N	35° 07.1'N	35° 07.3'N
long.	129° 05.3'E	126° 21.9'E	129° 03.4'E	129° 03.5'E

3.2 선체자장의 측정

선측(船側)으로부터 6m 떨어진 곳에 선수미선과 평행하게 관측선을 긋고, 이 관측선상의 임의 점에서 선체자장의 세기는 선박이 부두에 접안하여 있을 때 자장측정기(magnetometer)를 사용하여 측정한 자장의 세기와 선박이 이안하여 없을 때 측정한 자장의 세기와의 차이로 결정하였다.²⁹⁾

그 결과 한바다호의 경우를 예를들면 측정위치에서의 선체자장의 세기는 Table 2와 같다. 각 선박에 대하여 측정한 각 선박에 대하여 측정한 선체자장의 세기를 선체의 길이로 규격화한 측정위치에 대하여 그림으로 나타낸 것이 Fig.1이다.

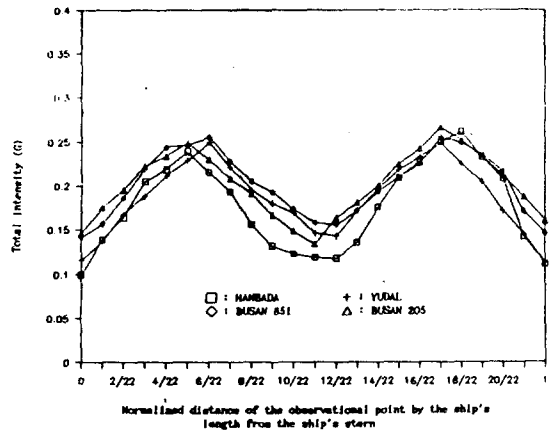


Fig. 1. The comparison of the magnetic intensity for the respective vessels observed along the observational line, 6meters away from the ship's side.

Table 2. The magnetic intensity of M/V Hanbada observed along the observational line, 6 meters away from the ship's side.

(Ship's heading : 036°, ship's position : lat. 35°04.4'N long. 129°05.3°E)

Dist. of obs. point from stern (m)	3 components of observed magnetism						3 components of ship's magnetism			Total intensity of ship's magnetism (G)
	Pier with ship			Pier without ship						
	Fore-and -aft (G)	Athwart- ship (G)	Vertical (G)	Fore-and -aft (G)	Athwart- ship (G)	Vertical (G)	Fore-and -aft (G)	Athwart- ship (G)	Vertical (G)	
0	-.184	.114	-.324	-.255	.177	-.352	.071	-.063	.028	.099
5	-.186	.067	-.300	-.255	.175	-.354	.069	-.108	.054	.139
10	-.207	.038	-.272	-.257	.172	-.352	.050	-.134	.080	.164
15	-.214	.009	-.239	-.258	.175	-.352	.044	-.166	.113	.206
20	-.272	-.002	-.222	-.255	.173	-.353	-.017	-.175	.131	.219
25	-.297	-.029	-.225	-.254	.168	-.354	-.043	-.197	.129	.239
30	-.330	-.010	-.268	-.255	.173	-.351	-.075	-.183	.083	.214
35	-.351	.021	-.290	-.254	.174	-.355	-.097	-.153	.065	.192
40	-.362	.063	-.333	-.253	.172	-.356	-.109	-.109	.023	.156
45	-.368	.105	-.343	-.255	.173	-.351	-.113	-.068	.008	.132
50	-.374	.133	-.351	-.257	.170	-.354	-.117	-.037	.003	.123
55	-.374	.174	-.363	-.255	.172	-.358	-.119	.002	-.005	.119
60	-.371	.211	-.364	-.259	.175	-.356	-.112	.036	-.008	.118
65	-.373	.241	-.386	-.259	.173	-.356	-.114	.068	-.030	.136
70	-.368	.298	-.411	-.258	.172	-.356	-.110	.126	-.055	.176
75	-.354	.341	-.429	-.257	.171	-.356	-.097	.170	-.073	.209
80	-.341	.365	-.444	-.257	.173	-.357	-.084	.192	-.087	.227
85	-.318	.397	-.453	-.258	.174	-.358	-.060	.223	-.095	.250
90	-.271	.411	-.466	-.253	.175	-.357	-.018	.236	-.109	.261
95	-.227	.390	-.438	-.253	.172	-.360	.026	.218	-.078	.233
100	-.210	.355	-.437	-.260	.171	-.354	.050	.184	-.083	.208
105	-.208	.295	-.403	-.262	.172	-.357	.054	.123	-.046	.142
110	-.201	.273	-.375	-.250	.174	-.354	.049	.099	-.021	.112

4. 결과 및 고찰

여기서는 2장에서 개발한 총체적 선체자장의 모델을 시뮬레이션하고 그 결과를 실측선체자장과 비교·검정하기로 한다.

우선 총체적 선체자장의 모델에서 편장회전타원체 내부의 자기원의 자화도와 방향을 다음과 같이 구한다. 임의 측정위치 (x,y,z) 에서의 실측선체자장과 식(2)에 의하여 변화된 좌표위치 (ξ,η,ϕ) 와 실측선체자장을 식(27)에 대입하여 최소자승법으로써 자화도 M 과 방향 α, β 를 결정한다.

Table 3은 2장에서 설명한 바와 같이 최소자승법으로 내부자화도 M , 그 방향 α, β 을 구한 결과를 나타낸 표이다. Table 3에 의하면 내부자화도는 선박의 규모가 작을수록 작아지는 경향이 있다. 방향 α 는 9.4~18.4(deg)의 범위이고, 방향 β 는 0.3~0.7(deg)로서 장축방향(x축)과 거의 일치함을 알 수 있다.

Table 3. Parameters of theoretical model for the respective vessels.

	M (A/M)	α (deg)	β (deg)
Hanbada	4024.0	9.4	0.7
Yudal	3860.3	15.9	0.7
Busan 851	2224.5	17.5	0.3
Busan 205	2083.9	18.4	0.3

한편, 임의 측정위치 (x,y,z) 에서의 총체적 선체자장 모델의 시뮬레이션은 Table 3의 내부자화도의 세기와 방향, 그리고 식(2)에 의하여 위치 (x,y,z) 에서 변화된 위치 (ξ,η,ϕ) 를 식(21)~식(23)에 대입하여 각 방향의 성분 자장을 구하고 식(24)로써 그들의 합성자장을 구한 후 이것을 식(25)에 대입하여 이루어졌다.

총체적 선체자장의 모델의 유의도는 커브피팅(curve-fitting)한 실측선체자장을 비교하여 분산분석법으로 검정하였다.³⁰⁾ Table 4는 이 모델의 시뮬레이션 결과와 실측선체자장을 대비한 표이다. Table 5는 Table 4의 값을 가지고 분산분석한 표이다. Table 5를 보면 잔차제곱평균에 대한 회귀제곱평균의 비인 F-비율이 44.3~93.5로서 F분포에서 유의수준 $\alpha=0.01$ 인 $F(\alpha)$ 보다 크므로 두 이론모델은 모두 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서 유의한 것을 알 수 있다. 또 결정계수 R^2 를 보면 81%~90%로서 실측자장을 잘 표현하고 있다고 볼 수 있다.

Table 4의 총체적 선체자장 모델을 시뮬레이션한 결과와 실측선체자장을 한바다호의 경우를 예를 들어 나타낸 그림이 Fig. 2이다. 이들 그림을 보면 시뮬레이션의 결과와 실측 선체자장은 국부적으로 어긋나는 곳은 있지만 총체적으로 보면 서로 잘 부합되고 있으며 선박의 크기에 관계없이 선체의 중앙 부근에 선체자장의 최소점이 있음을 시사해 주고 있다. 또 자장의 세기는 선수미 방향으로 갈수록 크게 나타나다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 최대자장의 위치와 최소자장의 위치는 실험대상선박에 관계없이 시뮬레이션 결과와 실측선체자장이 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다.

따라서 국부자장의 영향을 무시한다면 3도형선박의 경우 선체를 하나의 편장회전타원체형 자성체로 볼 수 있고 2장에서 개발된 총체적 선체자장 모델로서 이 자성체 외부의 최소자장점을 이론적으로 구명하는데 필요 요소, 자화도 M , 자화방향 α, β 를 구할 수 있다. 이들을 토대로 한 이론모델은 총체적 선체자장에 관한 기본 이론식으로서 선박형태에 관계없이 적용될 수 있는 이론 개발의 기초가 될 것이다.

Table 4. The result of the theoretical model and the magnetic intensity observed along the observational line, 6 meters away from the ship's side for respective vessels.

M/V Hanbada			M/V Yudal			M/V Busan 851			M/V Busan 205		
Dist. (m)	Obs. (G)	Theo. (G)	Dist. (m)	Obs. (G)	Theo. (G)	Dist. (m)	Obs. (G)	Theo. (G)	Dist. (m)	Obs. (G)	Theo. (G)
.0	.1112	.1049	.0	.1160	.0969	.0	.1420	.1094	.0	.1470	.1254
5.0	.1282	.1432	5.0	.1370	.1339	3.0	.1570	.1408	3.0	.1750	.1617
10.0	.1685	.1863	10.0	.1680	.1797	6.0	.1860	.1770	6.0	.1960	.1996
15.0	.2032	.2205	15.0	.1880	.2230	9.0	.2190	.2121	9.0	.2230	.2297
20.0	.2238	.2355	20.0	.2120	.2493	12.0	.2440	.2381	12.0	.2340	.2449
25.0	.2313	.2324	25.0	.2290	.2548	15.0	.2470	.2498	15.0	.2490	.2447
30.0	.2211	.2176	30.0	.2490	.2449	18.0	.2550	.2475	18.0	.2300	.2331
35.0	.1910	.1970	35.0	.2210	.2265	21.0	.2280	.2351	21.0	.2080	.2153
40.0	.1555	.1755	40.0	.1950	.2052	24.0	.2050	.2175	24.0	.1910	.1961
45.0	.1326	.1573	45.0	.1800	.1855	27.0	.1930	.1996	27.0	.1670	.1800
50.0	.1233	.1462	50.0	.1690	.1715	30.0	.1740	.1862	30.0	.1490	.1707
55.0	.1180	.1453	55.0	.1460	.1666	33.0	.1580	.1811	33.0	.1340	.1709
60.0	.1185	.1547	60.0	.1430	.1721	36.0	.1560	.1859	36.0	.1640	.1807
65.0	.1373	.1720	65.0	.1710	.1864	39.0	.1720	.1991	39.0	.1810	.1976
70.0	.1736	.1936	70.0	.1970	.2063	42.0	.1930	.2169	42.0	.2010	.2182
75.0	.2089	.2159	75.0	.2180	.2277	45.0	.2100	.2345	45.0	.2250	.2388
80.0	.2312	.2354	80.0	.2330	.2460	48.0	.2240	.2470	48.0	.2420	.2556
85.0	.2464	.2479	85.0	.2480	.2557	51.0	.2550	.2493	51.0	.2660	.2645
90.0	.2567	.2477	90.0	.2250	.2500	54.0	.2480	.2377	54.0	.2510	.2610
95.0	.2449	.2290	95.0	.2050	.2234	57.0	.2360	.2119	57.0	.2330	.2417
100.0	.1985	.1961	100.0	.1710	.1800	60.0	.2160	.1768	60.0	.2120	.2078
105.0	.1400	.1464	105.0	.1450	.1341	63.0	.1700	.1407	63.0	.1870	.1670
110.0	.1112	.1067	110.0	.1130	.0970	66.0	.1460	.1093	66.0	.1600	.1287

Where, Dist. : Distance of observational point from ship's stern

Obs. : Observational magnetic intensity

Theo. : Theoretical model

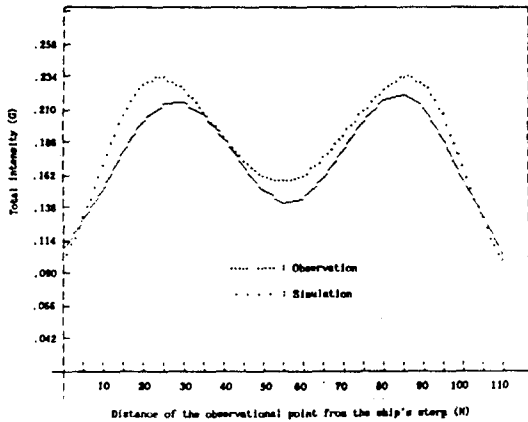


Fig. 2. The comparison of the result of the theoretical model with the magnetic intensity observed along the observational line, 6 meters away from the ship's side for M/V Hanbada.

Table 5. Variance analysis of theoretical model for respective vessels.

Ship's name		HAN-BADA	YUDAL	PUSAN 851	PUSAN 205
No of parameter		3	3	3	3
Sum of square	Regression	0.0391	0.0447	0.0407	0.0348
	Residual	0.0068	0.0058	0.0092	0.0037
Mean of square	Regression	0.0195	0.0223	0.0204	0.0174
	Residual	0.0003	0.0003	0.0005	0.0002
Degree of Freedom	Regression	2	2	2	2
	Residual	20	20	20	20
F		57.7**	76.8**	44.3**	93.5**
F(0.01)		5.85	5.85	5.85	5.85
Coefficient of determinant (R ²)		0.8519	0.8851	0.8156	0.9039

5. 결 론

본 연구는, 선박용 자기컴파스의 지북탐지기를 설치할 장소의 결정을 위한 기초 연구로서 총체적 선체자장을 편장회전타원체형 자성체에 의한

자장으로 간주하여 선체자장에 관한 이론을 제시하고 선박이 접안한 부두에서 실측한 자장과 비교 검정한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 편장회전타원체형 자성체 내부의 장축상에 배열된 자기원에 의거하여 구성한 총체적 선체자장의 모델에 의한 시뮬레이션 결과는 실측선체자장과 거의 일치하는 경향이 있다. 따라서 3도형 선박의 총체적 선체자장은 편장회전타원체의 내부의 자기원에 의한 것으로 간주할 수 있다.

② 선체자장의 최소점의 위치를 이론적으로 결정하는데 필요한 요소인 내부자화도, 그 방향은 본연구에서 제시된 이론모델을 이용하면 결정될 수 있다.

③ 선박의 내부자화도는 선박에 따라 그 값이 다르며 선박의 규모가 작을수록 작아지는 경향이 있다.

④ 선체의 길이에 대한 실측선체자장의 특성곡선은 선체의 중앙을 기준으로 주기성과 대칭성을 가지고 있다. 즉, 선체의 중앙부에서 최소치, 양측에서 피크치를 갖고 있는 곡선이다.

따라서 3도형 선박의 경우 총체적 선체자장은 편장회전타원체 내부의 자기원에 의한 자장으로 간주할 수 있고 이것을 토대로 구성한 총체적 선체자장의 모델은 선체의 외부자장의 특성을 규명하는데 유용하다는 것이 입증되었다.

참 고 문 헌

- 1) Alfred Hine, B.Sc : Magnetic Compass and Magnetometers, University of Toronto Press, pp. 267-280, 1968
- 2) G. A. A. Grant & J. Klinkert : The Ship's Compass, Routledge and Kegan Paul, PP.168-170, 1970
- 3) 이상집 : 기본 항해 기기, 아성출판사, pp. 249-250, 1982
- 4) 鈴木裕・濱田悦之・白井靖幸・波多野浩・齋藤清隆・松頼隆哉 : Digital指示磁氣compassの試作と性能に関する研究, 日本航海學會論文集, 第60號, pp. 29-36, 1976

- 5) 李相鍊·任政彬：遠隔指示式 磁氣콤파스에 관한 研究(I), 韓國航海學會誌, 第10卷, 第1號, pp. 81-100, 1986
- 6) 李相鍊·鄭泰權：遠隔指示式 磁氣콤파스에 관한 研究(II), 韓國航海學會誌, 第12卷, 第1號, pp. 55-63, 1988
- 7) 宮本佳則·濱田悦之·白井靖幸;齋藤清隆：ホル素子を用いた3軸固定型電子コンパスの試作, 日本航海學會論文集, 第80號, pp. 55-80, 1988
- 8) 朴吉鉉·鄭泰權·李相鍊：總體的 船體磁場の 實驗 모델, 韓國航海學會誌, 第13卷, 第3號, pp. 1-20, 1990
- 9) 鄭泰權·李相鍊：總體的 船體磁場の 理論 모델, 韓國航海學會誌, 第14卷, 第1號, pp. 1-7, 1990
- 10) 力武常次：地球電磁氣學, 岩波書店, pp. 59-60, 1972
- 11) W. Denne：Magnetic Compass Deviation and Correction, Brown, Son & Ferguson, pp. 62-68, 1951
- 12) U.S Naval Oceanographic office：Handbook of Magnetic Compass Adjustment, p.76, 1969
- 13) 佐藤新一·山本耕策：自差算法と修正, 海文堂, p.122, 1957
- 14) 孫雲澤(譯)：磁氣工學, pp. 84-105, 1980
- 15) Philip M. Morse & Herman Feshbach：Methods of Theoretical Physics, MaGraw-Hill, pp. 1284~1294, 1953
- 16) D. A. Nixon & F. E. Baker：Using Prolate Spheroidal Magnetization Distributions for Magnetic Modeling, Journal of Applied Physics, Vol. 52(2), p. 539, 1981
- 17) Roland H. Good Jr. & Terence J. Nelson：Classical Theory of Electric and Magnetic Field, Academic Press, pp. 15-19, 1971
- 18) George Arfken：Mathematical Methods for Physicists, Academic Press, pp. 481-484, 1985
- 19) Martin A. Plonus：Applied Electromagnetics, McGraw-Hill, pp. 324-325, 1978
- 20) John R. Reitz, Frederick J. Milford & Robert W. Christy：Foundations of Electromagnetic Theory, Addison-Wesley, pp. 191-194, 1980
- 21) Roald K. Wangsness：Electromagnetic fields, John Wiley & Sons, pp. 321-326, 1986
- 22) T. H. Havelock：The Moment on a Submerged Solid of Revolution Moving Horizontally, Quart. Journ. Mech. and Applied Math., Vol. V, Pt. 2, pp. 129-136, 1952
- 23) Touvia Miloh：The Ultimate Image Singularities for External Ellipsoidal Harmonics, SIAM Journal of Applied Mathematics, Vol.26, No.2, pp. 234-236, 1974
- 24) 前掲書：30) pp. 540
- 25) George B. Thomas Jr. & Ross L. Finney：Calculus and Analytic Geometry, Addison-Wesley, p. 341, 1988
- 26) 前掲書：10) p. 60, 1972
- 27) 中川徹·小裕義夫：最小二乘法にする實驗データ解析, 東京大學出版會, pp. 110-112, 1982
- 28) G. V. Reklaitis, A. Ravindran & K. M. Ragsdell：Engineering Optimization Methods and Application, Willy-Interscience, pp. 96-98, 1983
- 29) 前掲書：8) p. 4, 1989
- 30) 前掲書：8) pp. 10-14, 1989