

## 단일 침로에서의 자차 계수 $B$ 와 $C$ 획득방법

임정빈\*, 심영호\*\*

\*목포해양대학교 해상운송시스템학부, \*\*목포해양대학교 대학원 박사과정

### Acquisition Method for Deviation Coefficients $B$ and $C$ at a Single Bearing

Jeong-Bin Yim\*, Yeong-Ho Sim\*\*

\*Division of Maritime Transportation System, Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

\*\*Department Maritime Transportation System, Graduate School of Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

**요 약 :** 본 연구에서는 고정된 나침 방위에서 측정된 단일 자차만을 이용하여 자차계수  $B$  와  $C$  를 추정할 수 있는 새로운 방법을 기술하였다. 먼저, 4척의 미해군 함정에서 실제 측정된 자차를 이용하여 자차계수  $B$  와  $C$  만을 적용하여 자차합성하는 경우의 문제점을 분석하였다. 그리고, 최적 추정계수  $B$  와  $C$  의 획득 이론과 절차를 전개하고, 제안한 방법의 유효성을 평가하였다. 평가결과, 추정된  $B$  와  $C$  가 측정된 단일 자차를 최적으로 근사할 수 있음을 나타냈다.

**핵심용어 :** 자기 콤파스, 디지털 자기 콤파스, 자차수정, 영구자기, 유도자기

**ABSTRACT :** This paper describes a new estimation method for deviation coefficients,  $B$  and  $C$ , using only measured single deviation at a fixed compass bearing. At first, some problems in the deviation synthesis with only two coefficients,  $B$  and  $C$ , are discussed using observed deviation values measured in the four USS warships. Then, acquisition theories and procedures to obtain optimal coefficients,  $B$  and  $C$ , are expanded and then the efficiencies of the proposed prediction method are evaluated. As results from evaluations, it is shown that the approximated coefficients,  $B$  and  $C$ , can give optimal approximation to observed single deviation.

**KEY WORDS :** Magnetic Compass, Digital Magnetic Compass, Deviation Correction, permanent magnetism, induced magnetism

### 1. 서 론

13세기 자기 콤파스(Magnetic Compass)가 선박 항해에 사용된 이래, 무전원 작동, 영구적 사용 등의 장점으로 현대항법에서도 중요한 항해장비로 사용되고 있다. 특히, 최근 개정된 SOLAS 2000 규정에는 자기 콤파스에 대한 제반규정이 기존 규정 보다 오히려 강화되었다. 그 중에서, 선수방위전달장치(Transmitting Magnetic Heading Devices, TMHD)의 장착이 권고되었는데, TMHD는 기존 자기 콤파스에 자차수정을 충분히 행한 후, 선수방위신호를 전기신호로 전달토록 명시되어 있다(IMO-MS-C.86(70)).

이와 같이 자기 콤파스를 사용하는 경우, 자차문제는 필연적

으로 수반된다. 특히, 자기 콤파스의 전자항법 적용을 위해서는 자기 콤파스로부터 획득한 나침방위(Cpcompass bearing)를 진방위(True bearing)로 변환해야한다. 이를 위해서는 편차(Variation)와 자차(Deviation)를 획득해야하는데, 편차는 해도에서 간단히 획득할 수 있다(엄밀한 의미에서는 1도 이내에서 매시간 변하기 때문에 정밀계산이 필요하다). 그러나, 자차를 획득하기 위해서는 선박을 선회시키는 방법(Swinging method) 이외에는 아직까지 연구 개발된 바 없다. 이러한 이동체 선회에 의한 자차측정 방법이 지구자기를 방위측정 수단으로 사용하는 경우에 가장 큰 문제점이다(A. Hine, 1968; 이, 1970; 이 1986; KVVH, 1998; PNI Manual, 2002).

한편, 전자기술의 급속한 발전으로 기존 자기 콤파스 대체가 가능한 전자 자기 콤파스(Electronic Magnetic Compass, EMC) 또는, 디지털 자기 콤파스(Digital Magnetic Compass, DMC) 등이 한국(이 등, 1986, 임 등, 2002a; 임 2002b), 독일(Kelvin

\* 종신회원, jbyim@mmu.ac.kr 061)240-7051

\*\* 회원, navychang@hanmail.com

Hugh, 2004), 일본(Furuno, 2004), 노르웨이(Kongsberg, 2004), 미국(PNI, 2004) 등에서 개발된 바 있다. 이러한 EMC 또는 DMC(이하 DMC로 통일)는, 수백 g 정도로 가볍고, 100\$(달러) 이내로 저렴하며, 수 mW의 저전력 소모, 반영구적 사용 등의 장점을 갖는다. 그럼에도 불구하고 아직까지 DMC가 선박용 자기 콤파스를 대체하지 못하고 있는 가장 큰 이유는, 위에서 언급한 자차 보정문제 때문이다. 자기 콤파스는 물론이고 DMC 역시, 자차를 보정하기 위해서는 주위 철구조물에 의한 영구자기(Permanent magnetism)와 유도자기(Induced magnetism)를 분리 측정해야한다. 이를 위해서는 선박을 선회시켜야만 유도 자기 성분을 추출할 수 있다. 따라서, 우수한 DMC를 선박에 적용하더라도 자차를 획득하기 위해서 선박을 선회시켜야한다면, 비용대 효과면에서 굳이 기존 자기 콤파스를 DMC로 대체할 이유가 없을 것이다.

본 연구의 궁극적인 최종 목표 역시, 본 저자 등에 의해 선행 개발된 DMC(J.B. Yim *etc.*, 2004)를 향후 자기 콤파스 대체 장비로 사용코자함에 있으나, 자차 문제에 직면하게된 바, 이를 해결하기 위한 연구를 시도코자한다.

자차는 선박종류, 항해조건, 기상조건 등에 따라 수시로 변하기 때문에 전자 항해장비와의 인터페이스를 위해서는 엄밀한 의미에서 실시간 수정이 필요하다. 그러나, 자차수정 작업이 대단히 복잡하고, 중대형 선박의 경우 자기 콤파스가 콤파스 덱(Compass Deck)에 설치되어 있어 수정작업 환경이 용이하지 않다. 따라서, 시간적 여유를 확보할 수 없는 선박이나, 자차 수정작업에 필요한 안전해역을 확보하지 못한 경우에 자차수정은 불가능하다. 그리고, 잘못된 자차수정은 오히려 자기 콤파스에 가해지는 지자기 외란(Magnetic interference)을 증폭시킬 수 있기 때문에 일본(JCAA, 2004), 호주(AMSA, 1999) 등에서는 전문 자차수정사에 의한 수정을 규정으로 권고하고 있다.

자차의 실시간 수정은 19세기 초부터 연구되어 왔으나, 선박 선회라는 치명적인 단점을 해결하지 못한채, 자이로 콤파스(Gyrocompass)의 등장에 이은 GPS(Global Positioning System)의 등장으로 1990년대 들어 더 이상 거론되지 않고 있다. 그러나, 자이로 콤파스는 고가이며, 무겁고, 전원이 필요하여 선박 비상시 대책이 불가능하며, GPS의 경우에는 미국중속적이고, 전자파 차단이 발생하는 지역에서는 대책이 어렵고, 단거리 이동체에서는 고정밀 방위획득이 어렵다는 등의 문제점들이 지적되고 있다. 특히, 산업용 로봇(Borenstein *etc.*, 1996; Lauro Ojeda, 2000), 농업용 트랙터(E. R. Benson *etc.*, 1998; Mark A. Nixon *etc.*, 1998) 등의 소형 이동체 주행제어에 이들 GPS나 관성항법장치(Inertial Navigation System)를 사용하는 경우 많은 문제점들이 보고되고 있다.

이와 같이 최근들어 지구자기 정보는 산업진반에 걸쳐 중요하게 작용하고 있으나, 선박의 경우와 마찬가지로 자차문제에 관해서는 그 해결의 실마리를 찾지 못하고 있다. 한 예로서, 미국 군사장비 업체인 PNI사는 정밀도  $\pm 0.1$ 도의 3축 지구자기 센서를 이용한 방위획득 장비를 개발하여 시판하면서 일시자기와

영구자기(이 경우 일시자기를 'soft iron', 영구자기를 'hard iron'으로 표기)에 의한 자차를 분리 측정하기 위해서는 선회 방법 이외에 대책이 없음을 밝히고 있다(PNI Manual, 2002). 또한, 독일의 KVH사의 경우에도 정밀도  $\pm 0.5$ 도의 Fluxgate 센서를 이용한 전자 콤파스 C-100을 시판 중인데, 일반산업분야와 군사분야 및 선박분야에 적용하기 위한 최대의 문제점으로 자차수정을 위한 이동체 선회를 들고 있다(Lauro Ojeda, 2000). 일본의 FURUNO사(Furuno, 2004), 노르웨이 Kongsberg의 SIMRAD사(Kongsberg, 2004) 등에서도 Fluxgate 센서를 이용한 전자 콤파스를 시판하고 있으나 모두 동일한 문제에 직면하고 있다.

따라서, 이동체를 선회시키지 않고, 고정위치에서 자차를 측정할 수 있는 방법은, 지구자기를 방위측정 수단으로 사용하는 모든 분야에서 시급히 해결해야될 문제점이다. 그러나, 오랜기간 전 세계적으로 지적되온 자차 문제를 일시에 해결하기에는 관련 연구가 전무하고, 이동체를 선회시켜야만 나타나는 유도자기를 측정하는 것이 어렵기 때문에, 장기간의 연구가 필요할 것으로 보여진다.

따라서, 이 연구에서는 기존에 제시된 고정된 침로에서의 자차계수  $B$ 와  $C$ 의 측정방법(이, 1970)을 기초로, 기존 방법의 문제점을 검토하고, 새로운 자차측정 방법을 제시한 후, 그 유효성을 평가하였다. 그리고, 향후 연구방법론을 전개하는 것으로 이 연구의 범위를 제한하였다.

향후 본 연구에서 제안한 방법이 실용적으로 적용 가능한 단계까지 연구가 진행되면, 본 저자 등에 의하여 개발된 DMC를 이용하여 실시간 자동 자차분석 시스템을 개발하고, 더 나아가서는 DMC를 기존 자기 콤파스 대체 장비로 개발코자한다.

## 2. 기존 이론의 검토

### 2.1 선체자기와 지구자장

선체자기 이론(Alfred Hine, 1968)을 이용하면 선체의 구조물에 따른 이론적인 자기 콤파스의 자차를 다음 식(1)부터 식(3)으로 전개할 수 있다. 먼저, 지구자장을 다음 식(1)로 나타낸다.

$$\left. \begin{aligned} X_E &= H \cos \theta_0 \\ Y_E &= -H \sin \theta_0 \\ Z_E &= H \tan \beta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서,  $H$ : 지구자기의 수평지자력,  $Z$ : 지구자기의 수직지자력,  $\beta$ : 지구자기의 북각,  $\theta_0$ : 선수 자침방위.

그리고, 선체 자체에 의한 자장성분을 다음 식(2)와 같이, 선체중심좌표를 기준으로, 강철성분  $P, Q, R$  및, 연철성분  $a, b, c, d, e, f, g, h, k$  등으로 나타내면,

$$\left. \begin{aligned} X_M &= aH \cos \theta_0 - bH \sin \theta_0 + cH \tan \beta + P \\ Y_M &= dH \cos \theta_0 - eH \sin \theta_0 + fH \tan \beta + Q \\ Z_M &= gH \cos \theta_0 - hH \sin \theta_0 + kH \tan \beta + R \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

자기 콤파스 위치에서의 선내합성자장은 다음 식(3)으로 나

타난다.

$$\left. \begin{aligned} X_S &= (1+a)H \cos \Theta_0 - bH \sin \Theta_0 + cH \tan \beta + P \\ Y_S &= -(1+e)H \sin \Theta_0 + dH \cos \Theta_0 + fH \tan \beta + Q \\ Z_S &= gH \cos \Theta_0 - hH \sin \Theta_0 + (1+k)H \tan \beta + R \end{aligned} \right\} (3)$$

위의 식(1)부터 식(3)까지의 방법은 이미 Alfred Hine(1968) 이전부터 Poisson에 의해서 제안된 방법으로, 현대에도 위의 방법을 적용하여 자차문제를 전개하고 있다. 이러한 방법은, 지구 자기의 수평성분  $H$ , 수직성분  $Z$ 을 측정하고, 영구자기성분  $P, Q, R$  등과 유도자기성분  $a \sim k$  등을 각각 측정하면, 선 수 자침방위  $\Theta_0$  ( $\Theta_0 = \Theta + \delta$ ,  $\Theta$ 는 나침로,  $\delta$ 는 자차)에 따른 선내자장성분  $X_S, Y_S, Z_S$  등이 계산가능함을 의미한다.

그러나, 영구자기성분과 유도자기성분을 선박에서 각각 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 위의 식(3)을 전개하여 다음 식(4)와 같은 정계수(Exact coefficients)  $A_0, B_0, C_0, D_0, E_0$ 의 자차공식을 만들고,

$$\sin \delta = A_0 \cos \delta + B_0 \sin \theta + C_0 \cos \theta + D_0 \sin(2\theta + \delta) + E_0 \cos(2\theta + \delta) \quad (4)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 1 + \frac{a+e}{2}, & A_0 &= \frac{1}{\lambda} \frac{d-b}{2}, \\ B_0 &= \frac{1}{\lambda} \left( c \tan \beta + \frac{P}{H} \right), & C_0 &= \frac{1}{\lambda} \left( f \tan \beta + \frac{Q}{H} \right), \\ D_0 &= \frac{1}{\lambda} \frac{a-e}{2}, & E_0 &= \frac{1}{\lambda} \frac{d+b}{2} \end{aligned} \right\} (5)$$

실용적 측면에서,  $\delta$ 가 20도 미만으로 작다는 가정하에 위의 식(4)를 다음 식(6)과 같이 약계수(Approximated coefficients)  $A, B, C, D, E$  등으로 전개하여 선박에 적용하고 있다(임, 1995).

$$\delta_n = A + B \sin \theta_n + C \cos \theta_n + D \sin 2\theta_n + E \cos 2\theta_n + F \sin 3\theta_n + \dots \quad (6)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} \delta_n, & B &= \frac{2}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} \delta_n \sin \theta_n, \\ C &= \frac{2}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} \delta_n \cos \theta_n, & D &= \frac{2}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} \delta_n \sin 2\theta_n, \\ E &= \frac{2}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} \delta_n \cos 2\theta_n, & F &= \frac{2}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} \delta_n \cos 3\theta_n \end{aligned} \right\} (7)$$

$\delta_n$ : 등간격의 선수방위  $\theta_n$  ( $n=1, 2, \dots, N_p-1, N_p$ )에서 측정한 자차,  $N_p$ : 자차 측정수.

따라서,  $\theta_n$ 에 대한  $\delta_n$ 를 측정하면 약계수  $A, B, C, D, E, F, G, \dots$  등을 구할 수 있다. 선박에서는 일반적으로  $A$ 부터  $E$ 까지의 5개 약계수만을 이용하며, 각 약계수의 값에 따라서 선수미 'B' 자석, 정형 'C' 자석, 상한차 수정구, 프라인더스바(Flinder's Bar) 등의 수정용구를 이용하여 수정한다. 그리고,  $A_0 \sim E_0$  등의 정계수는 라디안(radian)으로 표시한 값이고,  $A \sim E$  등의 약계수는 도수(degree)로 표시한 것으로서, 이

들 사이의 변환은 근사적으로 정계수에  $180/\pi$ 를 곱하여 약계수를 구할 수 있다. 이하에서는 정계수와 약계수 구분없이 기술한다.

종합하면, 위의 식(6)에 의한 기존 방법을 적용하는 경우에는 반드시 선박을 선회시켜야만  $\theta_n$ 에 대한  $\delta_n$ 를 획득할 수 있는 문제점이 발생한다.

## 2.2 고정 침로에서의 자차계수

이 (1970)의 이론에 의하면, 위의 식(4)에서 정계수  $B_0, C_0$ 는 자차 양의 대부분을 차지하고, 일반적으로 상선은 연철이 대칭으로 구성되어 있기 때문에 대칭 연철에 의한 유도자기성분  $b=0, d=0$ , 따라서,  $A_0=0, E_0=0$  등으로 고려하여, 위의 식(3)을 다음 식(8)과 식(9)로 전개하고 있다.

$$\frac{H'}{H} \cos \theta = (1+a) \cos(\theta + \delta) + \lambda B_0 \quad (8)$$

$$-\frac{H'}{H} \sin \theta = -(1+e) \sin(\theta + \delta) + \lambda C_0 \quad (9)$$

여기서,  $H$ : 수평지구자장,  $H'$ : 선대수평자장.

그리고, 위의 식(8)과 식(9)에서의  $a$ 와  $e$ 를 다음 식(10)으로 나타내어,

$$\left. \begin{aligned} a &= \lambda(1+D_0) - 1 \\ e &= \lambda(1-D_0) - 1 \end{aligned} \right\} (10)$$

$B_0, C_0$ 를 다음 식(11)과 식(12)로 근사화하고 있다.

$$B_0 = \frac{H'}{\lambda H} \cos \theta_s - (1+D_0) \cos(\theta_s + \delta_s) \quad (11)$$

$$C_0 = -\frac{H'}{\lambda H} \sin \theta_s + (1-D_0) \sin(\theta_s + \delta_s) \quad (12)$$

여기서,  $\theta_s$ : 단일(single) 선수방위,  $\delta_s$ :  $\theta_s$ 에 대한 자차.

위의 식(11)과 식(12)에 의하면,  $\theta_s$ 에 대한  $\delta_s$ 를 측정하고, 이 때의  $H$ 와  $H'$ 를 측정함으로써  $B_0$ 와  $C_0$ 를 획득할 수 있다. 여기서, 문제가 되는 것이,  $H$ 와  $H'$ 의 측정 및,  $\lambda$ 와  $D_0$ 의 획득방법, 그리고, 연철체 구성이 비대칭인 경우 등이다.

(i) 우선,  $\lambda$ 와  $D_0$ 에 대해서 논의하면, 기존 방법은 경험에 의해서 또는, 같은 형태의 선박기록에서  $\lambda$ 와  $D_0$ 를 적당히 이용토록 제시하고 있다. 이러한 근거에는 실제 상선의 경우  $\lambda$ 가 0.97~0.70의 값으로 나타나기 때문이다. 그러나, 산업용 로봇이나, 인공위성, 자동차 등은 여러 가지 구조물로 구성되어 있고, 주위환경이 선박과는 대단히 다르기 때문에  $\lambda$ 와  $D_0$ 를 대푯값으로 사용할 수 없다.

(ii) 그리고,  $H$ 와  $H'$ 의 측정에 관해서, 선박에서는 지자기 측정장치를 이용하여  $H$ 와  $H'$ 를 측정하면 되지만, 실내와 같이  $H$ 를 측정하지 못하는 경우에는 문제가 발생한다.

(iii) 마지막으로, 가정한  $A_0=0, E_0=0$ 가  $A_0 \neq 0,$

$E_0 \neq 0$  인 경우에는 위의 식(11)과 식(12)를 적용하는 경우 큰 오차를 수반하게 된다.

여기서, 위의 식(8)부터 식(12)까지에 기술한 기존 방법은, 근본적으로 선박이 부두 정박시 일차적으로 대략의 자차수정을 행하기 위한 방법이기 때문에 다른 분야에 적용하는 경우 많은 문제점을 나타내고 있지만, 한편으로는 다음과 같이 대단히 유용한 방법으로 적용할 수 있다.

산업용 소형 로봇의 경우는 로봇 자체의 연결성분에 의한 유도자기 성분이 대단히 작고, 주위 구조물이 선박과 달리 고정되어 있기 때문에, 주로 영구자기성분에 의한  $B_0$ 와  $C_0$ 만이 존재한다. 따라서, 유도자기성분  $D_0$ 는 무시할 수 있으며,  $H$ ,  $H'$ ,  $\lambda$  등을 하나의 상수로 고려할 수 있다. 그리고, 로봇이 이동하기 전에 반드시 주위 구조물에 의한 유도자기와 영구자기성분을 구해야만 지속적인 진방위 획득이 가능하기 때문에 여하한 방법을 이용하더라도  $B_0$ 와  $C_0$ 를 획득할 수 있다면 안정된 주행이 가능하다. 이러한 경우, 위의 식(8)부터 식(12)까지에 기술한 기존 방법은 대단히 유용하게 응용할 수 있다.

한편, 현재 산업용 로봇이나, 자동차 등에서는 지구자장을 이용한 방위센서를 주 방위획득장치로 이용하면서 GPS나 소형 INS 등을 보조지원장치로 혼합 적용함으로써 위에서 기술한 문제점들을 해결하려고 있다. 그러나, GPS나 INS의 한계점으로 인하여 많은 문제점들을 발생시키고 있다.

이하에서는 위의 식(8)부터 식(12)까지에 기술한 기존방법에 기초하여, 고정침로에서  $B_0$ 와  $C_0$ 를 추정할 수 있는 새로운 방법을 기술한다.

### 3. 새로운 자차 계수 추정방법

#### 3.1 계수 $B_0, C_0$ 의 영향 분석

먼저, 다양한 구조물을 갖고 있는 선박에서도 위의 식(11)과 식(12)에서 제시한  $B_0$ 와  $C_0$  추정방법이 유용한지를 검토하기 위하여, 일단 자차 계수들이 전체 자차에 미치는 영향을 분석한다. 이 분석에는 미국 노퍽 해군해상전투시스템공학연구소(The Naval Sea Combat Systems Engineering in Norfolk)에서 최근 보고한 4척의 미해군 함정들의 자차측정(John B. Moore, Jr., 1998) 자료를 발췌하여 이용하였다. Table 1은 각 함정들의 40도 등간격 선수방위  $\Theta$ 에 대한 자차  $\delta$ 와,  $\delta$ 에 대

한 중간값(Median), 평균(Mean), 표준편차(std) 등을 나타낸다. Fig. 1은 미해군 홈페이지에서 발췌한 이들 4척 함정들의 실제 사진이다(USS Navy, 2004). Fig. 2에 Table 1에 나타낸 각 함정들의  $\Theta$ 에 대한  $\delta$ 를 나타냈다.

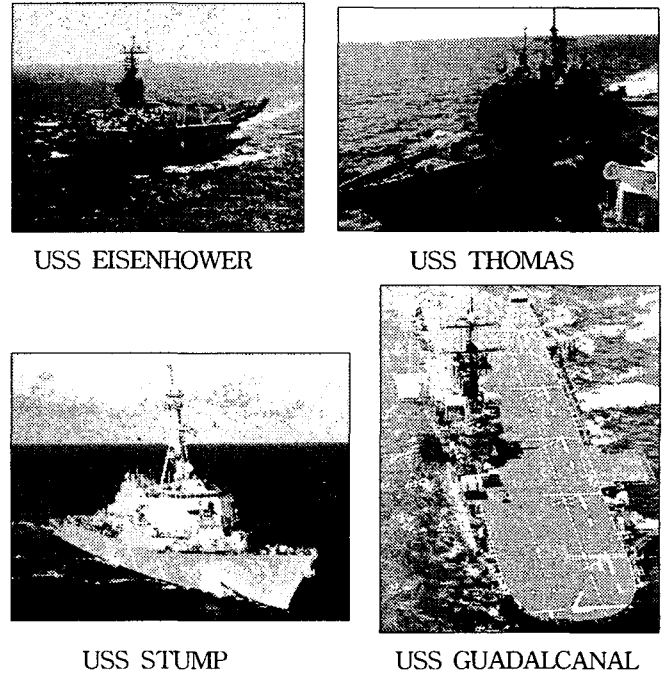


Fig. 1 Photos for the four USS warships

우선, Fig. 1을 통하여 함정들의 구조배치를 살펴보면, USS EISENHOWER호는 10만톤급 항공모함으로서 선교가 우현에 비대칭 설치되어 있다. USS THOMAS호는 1만톤급 이지스 전투함으로 자기장 차폐가 되어 있고, USS STUMP호는 9천톤급 전투함으로 다양한 함포와 구조물을 갖고 있다. USS GUADALCANAL호는 1만톤급 헬리콥터 수송함으로 선교가 우현에 설치되어 있다. 이러한 다양한 구조의 함정을 이용함으로써 상선과 달리 여러 가지 형태의 강철, 연철, 갑판 구조물에 따른 자차 영향을 분석할 수 있다.

다음으로, Table 1과 Fig. 2를 통하여 각 함정들의  $\delta$ 에 대해서 살펴보면, Fig. 2에서 전투함 STUMP호의  $\delta$ 가 가장 작은 편차를 나타낸 결과, 이에 대한 Table 2에서의 통계값도 가장 작게 나타나고 있다. 나머지 3척의  $\delta$ 에 대한 편차는 모두 크고, 선교가 우측에 비대칭 설치된 항공모함 EISENHOWER호

Table 1.  $\delta$  with  $\Theta$  and statistics for the  $\delta$

$\Theta$	0	40	80	120	160	200	240	280	320	Median( $\delta$ )	Mean( $\delta$ )	std( $\delta$ )
EISENHOWER	-3.10	+2.50	+3.70	+2.60	-2.70	-6.60	-6.10	-2.00	-1.30	-2.00	-1.44	+3.73
THOMAS	-5.75	-2.60	-0.82	+1.11	-2.28	-3.05	-5.70	-5.74	-3.60	-3.05	-3.16	+2.37
STUMP	-0.30	+0.60	-0.20	+0.05	+0.50	+0.50	+1.10	+1.80	+1.20	+0.50	+0.58	+0.69
GUADALCANAL	+2.90	+0.47	-0.29	-3.60	+0.99	+1.60	+1.05	+4.30	+3.50	+1.05	+1.21	+2.34

와 이지함 THOMAS호의 경우는  $\delta$ 의 중간값이 서향(Westerly)편차를 나타내고, 헬기모함 GUADALCANAL호의 경우는  $\delta$ 의 중간값이 동향(Easterly)편차를 나타내고 있다. 이러한 다양한 통계 특징들은 각 함정에서의 자기 콤파스 설치 위치와 구조물에 기인한다.

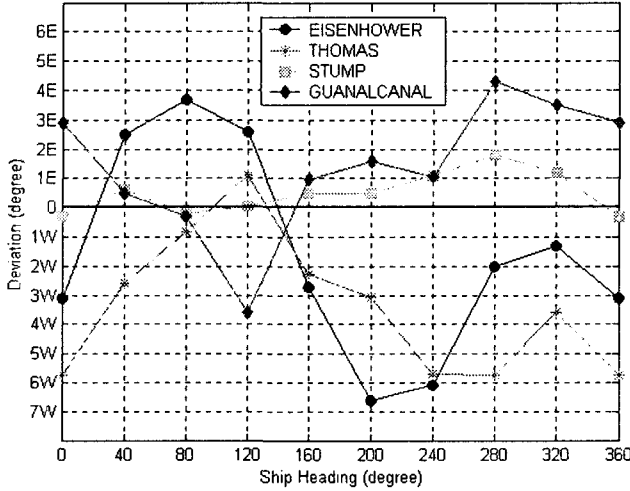


Fig. 2 Deviation  $\delta$  curves on the four USS warships

Table 2는 위의 식(7)을 이용하여 각 선박의  $\delta$ 로부터 산출한 9가지 약계수  $A \sim I$ 를 나타낸다.

Table 2. Approximate Coefficients from  $A$  to  $I$

Coefficient Ships name	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$	$F$	$G$	$H$	$I$
EISENHOWER	-1.44	3.76	1.91	-0.07	-2.19	0.38	-0.76	0.06	-0.17
THOMAS	-3.16	2.59	-0.96	-0.83	-0.54	-0.61	-0.29	-0.01	-0.06
STUMP	0.58	-0.73	-0.04	-0.08	-0.29	0.27	-0.30	0.06	-0.07
GUADALCANAL	1.21	-2.38	1.22	-0.03	0.68	0.18	-1.10	0.04	-0.24

일반적으로 상선에서는  $A \sim E$ 의 5가지 약계수만을 산출하여 자차수정을 행하고 있으나, 다양한 선체구조물이 배치된 경우에는  $F \sim I$ 까지 및 그 이상까지도 포함하여 평가함으로써 약계수의 영향을 보다 정확히 분석할 수 있다. Table 2의 경우, 함정 종류에 따라서  $F \sim I$  값들이 크게 남아 있다. 따라서, 함정 4척에 대한 약계수는  $A$ 부터  $I$ 까지의 9가지를 적용해야 정확한 분석이 가능함을 알 수 있다. 이하에서는 이러한 계수의 수가  $\delta$ 에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig.3는 Table 2의 9가지 계수 중에서,  $A \sim E$ 의 5가지만 적용한 경우부터  $A \sim I$ 의 9가지 모두를 적용한 각각의 경우에 발생하는 잔차  $\varepsilon_n | N_c$ 를 다음 식(13)의 표준편차  $std_{\varepsilon_n | N_c}$ 로 계산한 것이다.

$$std_{\varepsilon_n | N_c} = \left[ \frac{1}{N_p - 1} \sum_{n=1}^{N_p} (\varepsilon_n | N_c - \overline{\varepsilon_n | N_c})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

여기서,

$$\varepsilon_n | N_c = \delta_n - \delta_n | N_c, \quad (14)$$

$$\overline{\varepsilon_n | N_c} = \frac{1}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} \varepsilon_n | N_c, \quad (15)$$

$\varepsilon_n | N_c$ : 약계수의 가지 수  $N_c$ 에 대한  $n$ 의 잔차로서  $n=1, 2, \dots, N_p-1, N_p$ ,  $N_p$ : 자차 측정수(Fig. 2의 경우는 9),  $\delta_n$ : 위의 식(6)을 이용하여 계산한 실제 측정된  $n$ 의 자차(Fig. 2의 자차를 의미),  $\delta_n | N_c$ : 위의 식(6)에서 약계수의 가지 수를  $N_c$ 로 한 경우의  $n$ 의 자차,  $\overline{\varepsilon_n | N_c}$ :  $\varepsilon_n | N_c$ 의 평균을 의미.

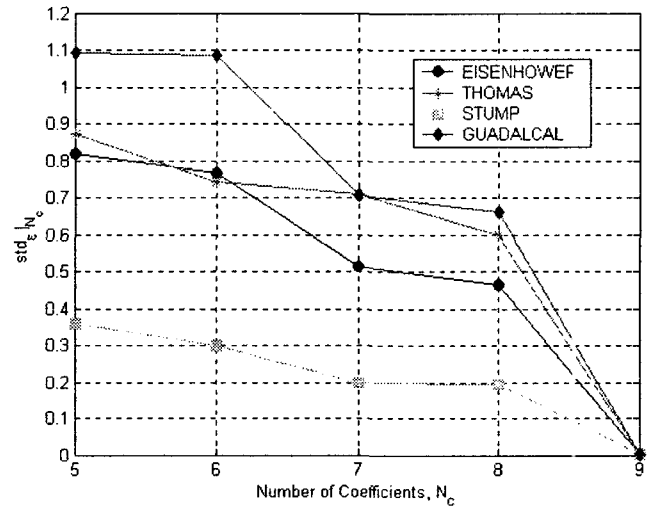
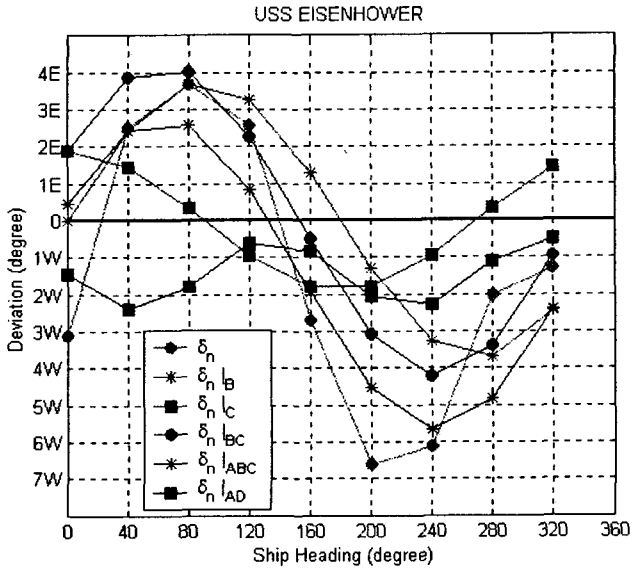


Fig. 3 Evaluations of deviation residuals according to the number expansion of coefficients from  $A$  to  $I$

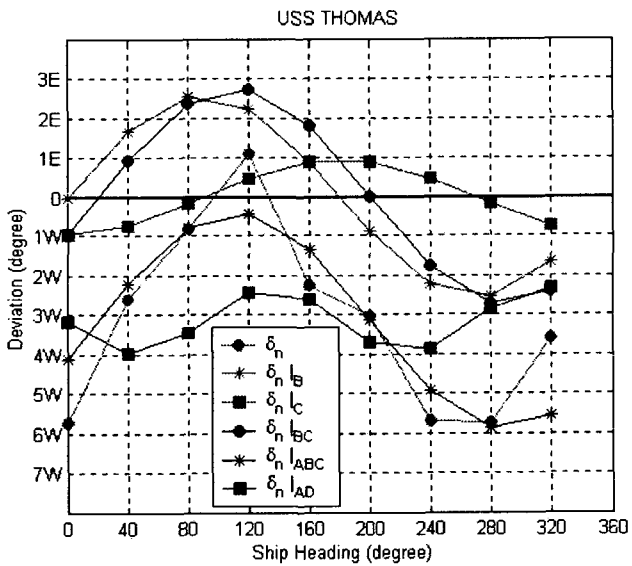
Fig. 3에서  $N_c$ 가 5에서 9로 증가할 수록  $std_{\varepsilon_n | N_c}$ 가 지수함수적으로 감소하고, 전투함 STUMP호를 제외하고는  $N_c=8$ 을 적용한 경우,  $std_{\varepsilon_n | N_c} < 0.5$ 로 형성되고 있다. 따라서, 정밀 자차분석을 위해서는  $A$ 부터  $I$ 까지 9개 모든 계수를 적용해야 함을 알 수 있다. 그러나, 선박의 경우, 자기 콤파스 비너클(Binnacle)에 설치된 수정용 자석은 일반적으로  $A$ 부터  $E$ 까지의 5가지 계수만을 적용토록 제작되어 있고, 실용적인 측면에서  $E$  이상의 계수들의 영향은  $A$ 부터  $E$ 까지를 적당히 조절함으로써 보상할 수 있다. 일단, 이하에서도 실용적인 측면을 고려하여  $A$ 부터  $E$ 까지의 5가지 계수에 대해서만 고려하여, 각 계수들이  $\delta$ 에 미치는 영향을 조사한다.

Fig. 4는  $A \sim E$ 의 계수들을 여러 가지로 조합한 경우의 자차  $\delta_n | N_c$ 와 실제 측정된 자차  $\delta_n$ 를 각 함정별로 나타냈

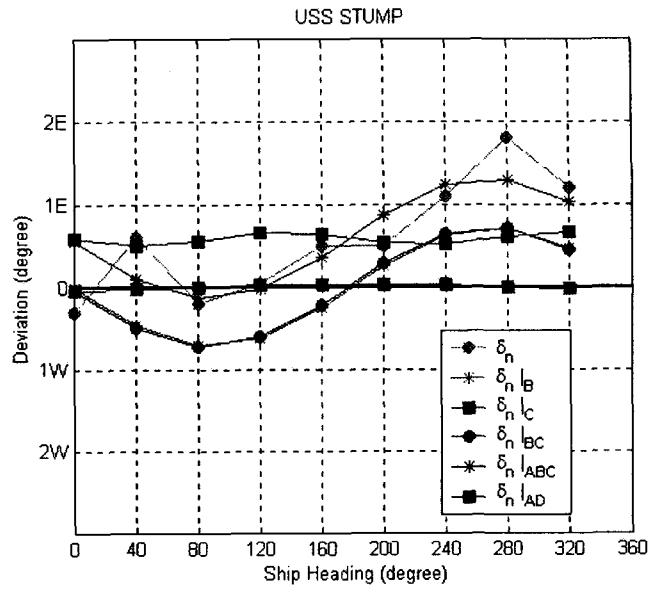
다. 여기서, 편의상  $B$ 만 적용한 경우를  $\delta_n|_B$ ,  $C$ 만 적용한 경우를  $\delta_n|_C$ ,  $B$ 와  $C$ 를 적용한 경우를  $\delta_n|_{BC}$ ,  $A, B$  및  $C$ 를 적용한 경우를  $\delta_n|_{ABC}$ ,  $A$ 와  $D$ 를 적용한 경우를  $\delta_n|_{AD}$  등으로 나타낸다.



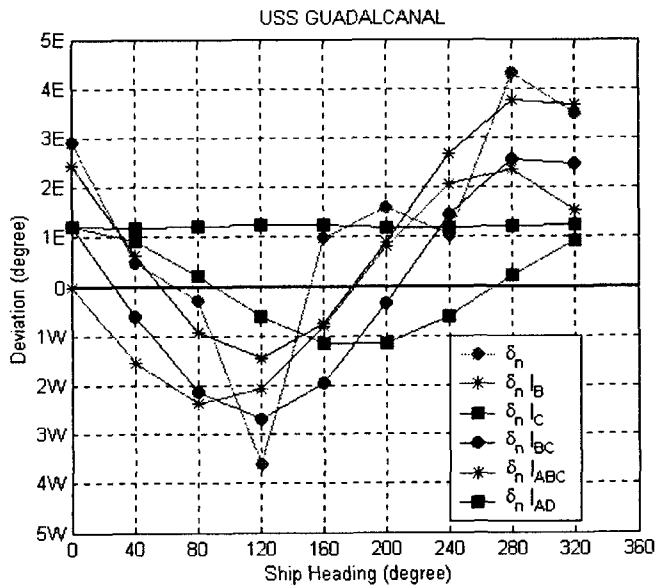
(a) USS EISENHOWER



(b) USS THOMAS



(c) USS STUMP



(d) USS GUADALCANAL

Fig. 4 Deviation curves for  $\delta_n$  and  $\delta_n|_{N_c}$  with various combinations of coefficients

Fig. 4에서 전반적으로  $\delta_n|_B$ 와  $\delta_n|_C$ 는 위의 식(6)에 나타난 바와 같이 cosine과 sine 성분의 2분원차로 나타나고, 이들이 조합된  $\delta_n|_{BC}$ 의 경우, 실제 측정된  $\delta_n$ 와 유사한 형태로 나타났다.  $\delta_n|_{ABC}$ 의 경우는,  $A$  성분이 자차의 평균값으로서 바이어스 성분을 갖기 때문에  $\delta_n|_{BC}$ 와 비교하여  $\delta_n$ 에 보다 근접하고,  $\delta_n|_{AD}$ 의 경우는 4분원차의 특징을 나타낸다.

이러한 특징을 종합하여 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5는 계수

$A, B, C$  및  $D$ 를 조합한 경우에 발생하는  $std_r | N_r$ 를 위의 식(13)으로 계산한 것이다.

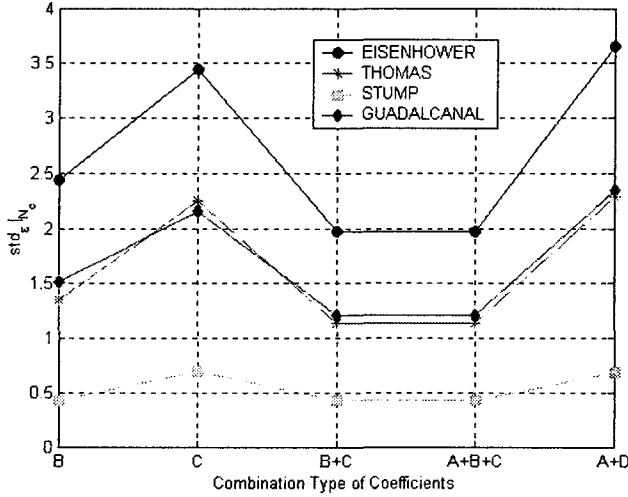


Fig. 5 Evaluations of deviation residuals according to the combination types of coefficients,  $A$  to  $D$

Fig. 5의 경우, 위의 Fig. 4에서 살펴본 바와 같이, 계수  $B$ 와  $C$ 의 영향이 가장 크기 때문에, EISENHOWER호를 제외하고  $\delta_n |_{BC}$ 와  $\delta_n |_{ABC}$ 의  $std_r | N_r$ 가 1.3도 이내로서 유사한 값을 나타내고,  $\delta_n |_B$ 의 영향이  $\delta_n |_C$ 의 영향 보다 큼을 알 수 있다. EISENHOWER호는  $\delta_n |_{BC}$ 의  $std_r | N_r$ 가 2도로서, 계수  $B$ 와  $C$ 만을 적용하여 자차를 수정하기에는 곤란한 것으로 고려된다. 다른 합정들도 STUMP호를 제외하고는  $std_r | N_r$ 가 1도 이상 발생하고 있기 때문에 정밀 자차수정을 위해서는  $B$ 와  $C$  이외의 추가 계수를 고려해야함을 알 수 있다.

이상의 분석결과로부터, (i) 기존 상선에서 사용하고 있는 5가지 계수  $A \sim E$ 를 이용하는 방법은 Fig. 3에서 분석한 바와 같이 정밀도 1도 이상을 요할 시, 계수 추가를 고려해야 하고, (ii) 특히, 위의 식(11)과 식(12)에서 제시하고 있는  $B$ 와  $C$ 만을 적용하는 방법은 합정별 편차가 크기 때문에 유의해야함을 알 수 있다.

### 3.2 고정침로에서 자차계수 추정방법

본 연구에서 제시하는 고정침로에서의 자차계수 추정방법은 다음의 조건하에서 전개한다.

조건 1) 현 위치에서의 편차를 해도나 지구자장 모델을 이용하여 정확하게 획득할 수 있다.

조건 2) 선행 연구에서 개발한 DMC를 이용하여 단일 나침로  $\theta_s$ 에 대한 단일 자차  $\delta_s$ 를 획득할 수 있다. 여기서, 선행연구 개발한 DMC는 액체를 이용하여 센서를 수평유지하기 때문

에 이동체가 수평일 필요는 없다.

조건 3) 이동체가 속한 공간에서의 연철제 구성은 알 수 없고, 위의 식(11)과 식(12)과 달리 매개변수  $U_1$ 과  $U_2$ 를 적용하여,  $B_0$ 와  $C_0$ 를 획득한다.

위의 조건하에서 다음과 같이 고정침로에 대한 자차계수 추정 방법을 기술한다. 먼저, DMC를 이용하여 고정 방위  $\theta_s$ 에서의 단일 자차  $\delta_s$ 를 측정한다. 그리고,  $B_0$ 와  $C_0$ 를 계산하기 위한 위의 식(11)과 식(12)에 매개변수  $U_1$ 과  $U_2$ 를 적용하고, 이 때의  $B_0$ 와  $C_0$ 에 대한 근사의 의미로서  $B_0$ 와  $C_0$ 를 도입하여 다음 식(16)과 식(17)로 표시한다.

$$B_0 = U_1 \cos \theta_s - (1 + U_2) \cos (\theta_s + \delta_s) \quad (16)$$

$$C_0 = -U_1 \sin \theta_s + (1 - U_2) \sin (\theta_s + \delta_s) \quad (17)$$

여기서,

$$U_1 = \frac{H'}{\lambda H} + \varepsilon_{U_1}, \quad (18)$$

$$U_2 = D_0 + \varepsilon_{U_2}, \quad (19)$$

$\varepsilon_{U_1}$ ,  $\varepsilon_{U_2}$ : 각각  $U_1$ 과  $U_2$ 의 오차.

위의 식(16)과 식(17)의 근사 정계수  $B_0$ ,  $C_0$ 를 근사 약계수  $B$ ,  $C$ 로 나타내고,  $U_1$ 과  $U_2$ 를  $-c_1$ 부터  $+c_1$  사이에서 변화 시키면서 다음 식(20)의 근사 자차를 계산한다.

$$\delta_s |_{-c_1}^{+c_1} = B \sin (\theta_s) + C \cos (\theta_s) \quad (20)$$

그리고, 다음 식(21)로 절대오차  $\varepsilon_s |_{-c_1}^{+c_1}$ 를 구하고,

$$\varepsilon_s |_{-c_1}^{+c_1} = \sqrt{(\delta_s - \delta_s |_{-c_1}^{+c_1})^2}, \quad (21)$$

$\varepsilon_s |_{-c_1}^{+c_1}$ 가 최소화되는  $U_1$ 과  $U_2$ 를 다음 식(22)로 구한 후,

$$f(U_1, U_2) = \text{MIN} \left[ \sum_{i=-c_1}^{+c_1} \sum_{j=-c_1}^{+c_1} (\varepsilon_s |_{ij}) \right], \quad (22)$$

다시, 위의 식(16)과 식(17)에서 최종 추정 계수  $B$ ,  $C$ 를 계산한다.

최종 추정한  $B$ ,  $C$ 에 대한 평가는 다음 식(23)과 식(24)로 하였다. 식(23)은  $\theta_s$ 에서 실제 측정된  $\delta_s$ 와, 식(25)에  $B$ ,  $C$ 를 대입하여 계산한  $\delta_s |_{BC}$  사이의 잔차(residual)이고, 식(24)는 식(26)에 실제 측정된  $B$ ,  $C$ 를 대입하여 계산한  $\delta_s |_{BC}$ 와, 식(25)의  $\delta_s |_{BC}$ 와의 잔차를 나타낸다.

$$\hat{\varepsilon}_s = \sqrt{(\delta_s - \delta_s |_{BC})^2} \quad (23)$$

$$\varepsilon_s |_{BC} = \sqrt{(\delta_s |_{BC} - \delta_s |_{BC})^2} \quad (24)$$

여기서,

$$\delta_s |_{BC} = B \sin (\theta_s) + C \cos (\theta_s), \quad (25)$$

$$\delta_s |_{BC} = B \sin (\theta_s) + C \cos (\theta_s). \quad (26)$$

## 4. 평가 및 검토

### 4.1 평가

Fig. 6는 4척의 함정에서 실제 측정된 자차  $\delta_n$ 을 이용하여 위의 식(16)부터 식(22)까지의 계산 과정에서 산출한  $U_1$ 과  $U_2$  중에서,  $U_1=1.0$ 으로 고정했을 때의  $U_2$ 를 나타낸다. 따라서, 9가지의  $\delta_s$ 를 적용한 것이 된다.

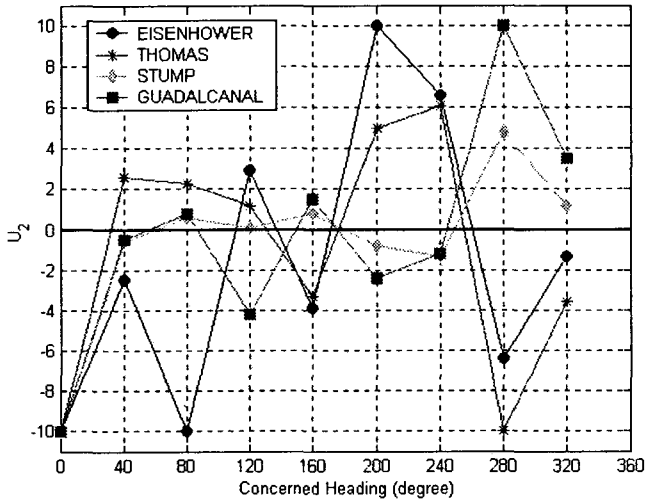
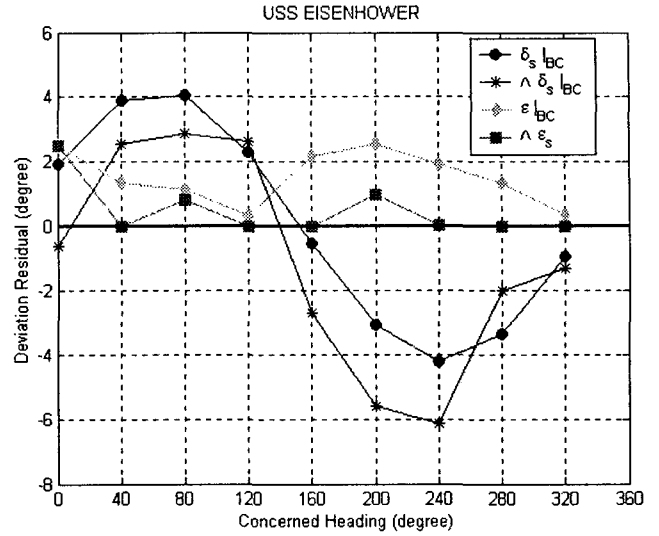


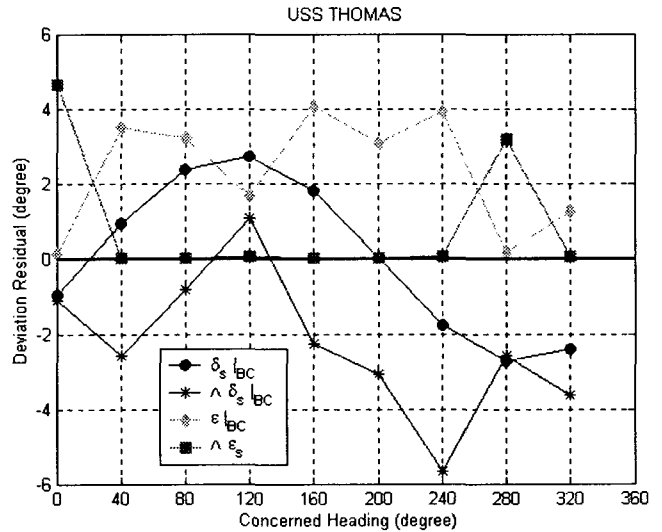
Fig. 6 Estimation results of  $U_2$  (when,  $U_1=1.0$ ) according to  $\delta_n$  with  $\theta_n$  on four warships

Fig. 6에서,  $\theta_n$ 의 변화에 따라서  $U_2$ 의 변화 폭이 크게 나타나고 있다. 그 이유는,  $U_1 (= \frac{H'}{\lambda H} + \varepsilon_{U_1})$ 의 선내수평자장 성분  $H'$ 의 경우  $\theta_n$ 에 따라서 값이 변하는 것인데, 1.0으로 고정하였고,  $\lambda$ 와  $H$ 의 값을 반영하지 않은 결과,  $U_2$ 에서 모두 그 변화분을 수용한 결과이다. 여기서,  $U_1=1.0$ 으로 가정한 이유는, 만약,  $\lambda, H, H'$  등을 측정하지 못한 경우에 본 연구에서 제시한 방법으로  $B_0$ 와  $C_0$ 의 측정이 가능한지 여부를 알아보기 위함이다.

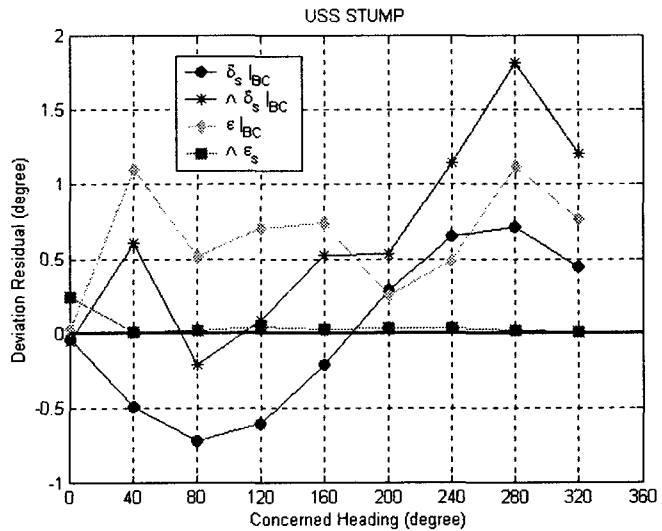
Fig. 7은 위의 식(23)부터 식(26)까지를 이용하여 각 함정에 대해서 최종 추정된  $B, C$ 를 평가한 결과들이다. Fig. 7에서, 프로그램상의 호환성 문제로 인하여, 식(23)의  $\hat{\varepsilon}_s$ 에 대한 표시는  $\hat{\varepsilon}_s$ 로 나타나고, 식(25)의  $\delta_s|_{BC}$ 의 표시는  $\hat{\delta}_s|_{BC}$ 로 나타났다. 식(24)의  $\varepsilon_s|_{BC}$ 와 식(26)의  $\delta_s|_{BC}$ 는 그대로 표기되어 있다.



(a) USS EISENHOWER

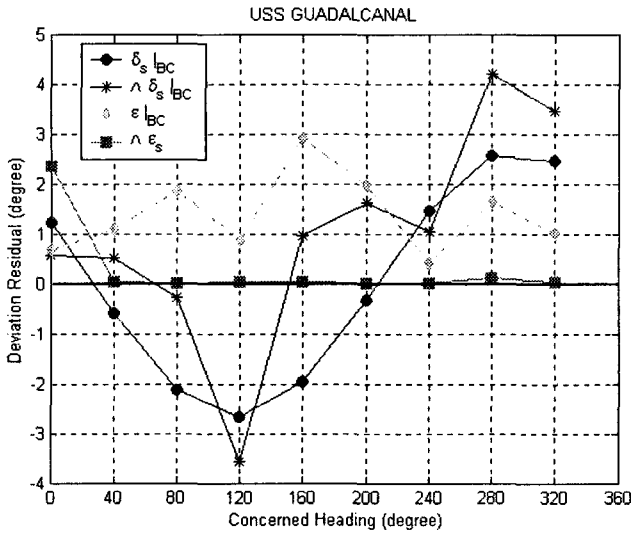


(b) USS THOMAS



(c) USS STUMP





(d) USS GUADALCANAL

Fig. 7 Evaluations by  $\hat{\varepsilon}_s$  in Eq. (23),  $\varepsilon_s|_{BC}$  in Eq. (24),  $\hat{\delta}_s|_{BC}$  in Eq. (25) and  $\delta_s|_{BC}$  in Eq. (26)

Fig. 7에서, 합성한 자차들의 경향을 먼저 살펴보면,  $\delta_s|_{BC}$  (즉, 실제 측정된  $B, C$ 를 이용하여 합성한 자차)와  $\hat{\delta}_s|_{BC}$  (즉, 추정된  $B, C$ 를 이용하여 합성한 자차)의 경우, 4척의 합성 모두 서로 유사한 분포를 나타내면서 일종의 바이어스가 가해진 형태로 나타나고 있다. 한편,  $B, C$ 의 유효성은  $\delta_s|_{BC}$ 와 실제 측정된 자차  $\delta_s$ 와의 차가 최소로 되는지의 여부로서 평가할 수 있기 때문에 다음과 같이 잔차의 경향을 살펴본다.

Fig. 7에서,  $\hat{\varepsilon}_s$  (즉, 실제 측정된 자차  $\delta_s$ 와  $B, C$ 를 이용하여 계산한  $\delta_s|_{BC}$  사이의 잔차)의 경우는 일부를 제외하고 대부분 0을 나타내는데 반하여,  $\varepsilon_s|_{BC}$  (즉, 실제 측정된  $B, C$ 를 이용하여 계산한  $\delta_s|_{BC}$ 와  $B, C$ 를 이용하여 계산한  $\delta_s|_{BC}$  사이의 잔차)는 큰 오차를 유발하고 있다. 따라서, 본 연구에서 제시한 방법으로 추정된  $B, C$ 는 실제 측정된 자차  $\delta_s$ 와의 차를 최소화하도록 전개됨을 알 수 있다.

#### 4.2 검토

현재까지의 연구결과, 본 연구에서 제시한 방법에는 장점과 문제점이 나타나고 있다.

우선, 현재까지의 문제점을 검토하면 다음과 같다. 본 연구에서 제안한 방법을 대형선박에 적용하는 경우,  $\Theta_n$  각각에 대해서  $U_2$ 를 구해야한다. 그 이유는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 선박의 경우, 주위 구조물과 자기 콤팩스(또는 DMC)가 함께 이동하기 때문에  $\Theta_n$ 에 대해서  $U_1 = \frac{H'}{\lambda H} + \varepsilon_{U_1}$ 가 변함으로,

$U_2$ 를 하나의 대푯값으로 나타낼 수 없기 때문이다. 또한, 추정된  $B, C$ 가 실제 측정된 자차  $\delta_s$ 와의 차를 최소화 할 수 있도록 구해진 경우일지라도 오히려 과도한 값을 갖는  $B, C$ 가 추정될 수 있는데, 실제 선박에서의 자기 콤팩스 자차수정을 고려하는 경우, 과도한  $B, C$  계수값에 의한 자차수정은 큰 오차를 유발할 우려가 있다. 또한, 일부 선수방위에서 잔차가 크게 되는 현상도 향후 극복해야할 과제이다.

한편, 실내에서 이동하는 로봇과 소형 선박을 고려하는 경우, 로봇이 이동하는 실내는 구조물이 고정되어 있고, 소형 선박은 연철성분이 대단히 작기 때문에 대형 선박과 달리 유도자기성분이 작을 것으로 고려된다. 이러한 경우,  $U_1 = \frac{H'}{\lambda H} + \varepsilon_{U_1}$ 의 변화가 극히 작을 것으로 예상됨으로  $U_2$  값이 고정 상수로 남을 것으로 보인다. 따라서, 이 연구에서 제안한 방법으로 추정된  $B, C$ 를 이용함으로써 지속적인 자차수정이 가능하다고 고려된다.

위에서 살펴본 바와 같이, 향후 본 연구는 대형 선박에 적용하는 경우와 함정에 적용하는 경우, 주위 구조물이 고정된 경우 등으로 분리하여 연구를 지속하는 것이 타당할 것으로 보여진다. 그리고, 대형 선박에 적용하기 위해서는 선행 연구개발한 DMC가 지구자장 및 선체자장을 측정하는 기능과, 나침방위를 획득할 수 있는 이중 기능이 필요함을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기존의 자차이론과, 고정된 침로에서의 계수  $B, C$  획득방법에 기초하여 새로운 자차계수 획득 방법을 시도하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 지구수평자장  $H$ , 선내수평자장  $H'$  및  $\lambda$ 를 알 수 없는 상태에서, 고정 침로  $\Theta_s$ 에서 측정된 단일 자차  $\delta_s$ 만을 이용하여 계수  $B, C$ 를 획득하는 새로운 방법을 제시하였다. 제안한 방법은 주위 구조물이 고정된 경우에 유효함을 알았다.

(2) 본 연구에서 제안한 매개변수  $U_1$ 과  $U_2$ 를 이용하여 최적화하는 방법은, 실제 측정된  $\delta_s$ 를 최적으로 근사하였다.

(3) 본 연구에서 제안한 방법은, 선박과 같이 구조물이 함께 이동하는 경우와, 주위 구조물이 고정된 경우 등으로 분리하여 전개하는 것이 타당함을 알았다.

(4) 자차계수  $A, B, C, D, E$  등 5개만을 이용하는 기존 선박에서의 자차분석 및 합성 방법을 타 산업분야에 적용할 경우, 그 영향을 분석할 수 있는 이론을 제시하였다. 그리고, 이 방법에 의해서 실제 미해군 함정 4척의 자차를 분석한 결과, (i) 다양한 구조물로 구성된 이동체에서는 기존 방법을 적용하는 경우 주의가 필요하고, (ii) 기존 이론과 동일하게 계수  $B, C$ 의 합성 영향이 가장 지배적이었으나, 잔차가 크게 남는 현상을 확

인하였다.

편차의 경우에도 정밀 자차측정을 위해서는 실시간 측정이 필요하고, 본문에서 제기한 다양한 문제점을 해결하기 위해서는 선박과 로봇 등에서의 실제 실험이 필요하다. 이러한 실험을 위해서는 무엇보다 고정밀 선체자기 측정과 선수방위 측정이 동시에 가능한 디지털 자기 콤파스(DMC)의 개발이 시급하다.

향후, 제기한 문제점들을 상황별로 분리한 후, 단계별로 연구를 지속할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 목적기초연구(R05-2004-000-10760-0) 지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] Alfred Hine (1968), *Magnetic Compasses and Magnetometers*, Adam Hilger Ltd., Great Britain, pp.267-303
- [2] AMSA (1999), *MARINE ORDERS, Part 21, Navigation Equipment, Issue 3, October No 17 of 1999*, Australian Maritime Safety Authority(AMSA), <http://amsa.gov.au>
- [3] E.R. Benson, T.S. Stombaugh, N. Noguchi, J.D. Will and J.F. Reid (1998), "An Evaluation of a Geomagnetic Direction Sensor for Vehicle Guidance in Precision Agriculture Applications," 1998 Annual International Meeting, Paper No. 983203, UILU 98-7011
- [4] Furuno (2004), *Fluxgate Compass C-500*, <http://www.furuno.co.jp>
- [5] IMO-MS-C.86(70), Annex 17, *Adoption of New and Amended Performance Standards for Navigational Equipment*, IMO
- [6] J.B. Yim, Y.H. Shim, C.K. Kim and G.Y. Choi (2004), "Digital Magnetic Compass With Smart Correction Function-Recent Experimental Results and Further Works -," Asia Navigation Conference 2004, Korea, pp.29-36
- [7] J. Borenstein, H. R. Everett, and L. Feng (1996), *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*, University of Michigan For the Oak Ridge National Lab (ORNL) D&D Program and the United States Department of Energy's Robotics Technology Development Program
- [8] John B. Moore, Jr. (1998), "A Solution to the Classical Problems of a Magnetic Compass in a Steel Ship," Naval Sea Combat Systems Engineering Station, Norfolk, Virginia
- [9] JCAA (2004), Japan Compass Adjustment Association, <http://www.jcaa.jp>
- [10] Kelvin Hugh (2004), *C100 Compass Engine*, <http://www.kvh.com>
- [11] Kongsberg (2004), *Simrad RFC35 Fluxgate Compass*, [www.simrad.com](http://www.simrad.com)
- [12] KVH (1998), *Overview of Compass Technology*, White paper at <http://www.kvh.com>
- [13] Lauro Ojeda and Johann Borenstein (2000), "Experimental Results with the KVH C-100 Fluxgate Compass in Mobile Robots, Proc. of the IASTED International Conference Robotics and Applications 2000
- [14] Mark A. Nixon, Bruce C. McCallum, W. Richard Fright and N. Brent Price (1998), "The Effects of Metals and Interfering Fields on Electromagnetic Trackers Presence," Vol.7, No.2, pp.204-218
- [15] NGIA (2004), *Handbook of magnetic Compass Adjustment, National Geospatial-Intelligence Agency*, Bethesda, MD, <http://pollux.nss.nima.mil>
- [16] PNI (2004), *TCM2 Electronic Compass Module*, <http://www.pnicorp.com>
- [17] PNI Manual (2002), *TCM2 Electronic Compass Module User's Manual Revision 1.09*, <http://www.pnicorp.com>
- [18] USS Navy (2004), <http://www.navysite.de>
- [19] 이상집 (1986), *항해계기학*, 세종출판사, pp.1-130
- [20] 이상집, 임정빈 (1986), 원격지시식 자기 콤파스에 관한 연구( I )," 한국항해학회지, 제10권(제1호), pp.81-100
- [21] 이종락 (1970), *항해계기(제1권)*, 한국해양대학 해사도서출판부, pp.1-139
- [22] 임정빈 (1995), *학습지침서 항해계기학*, 해군사관학교, pp.121-124
- [23] 임정빈 (2002a), "2-체널 링-코어 플릭스 게이트 콤파스의 위상검출회로 설계와 구현에 관한 연구," 한국항해항만학회지, 제26권, 제1호, pp.127-136
- [24] 임정빈, 정중식, 박성현, 김봉석 (2002b), "2-체널 링-코어 플릭스-게이트 콤파스의 성능평가 시스템 개발," 한국항해항만학회지, 제26권, 제5호, pp.529-535