

# 고정밀 플럭스-게이트 센서를 이용한 선박용 디지털 컴퍼스 개발

임 정 빈\*

\*목포해양대학교 해상운송시스템학부

## Development of Ship's Digital Compass Using Flux-gate Sensors with High Accuracy

Jeong-Bin Yim\*

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

**요 약** : 이 연구의 최종목적은 기존의 선박용 자기 컴퍼스를 대체할 수 있는 디지털 컴퍼스 개발에 있다. 우선, 3축의 고정밀 플럭스-게이트 센서와 소형 스텝 모터를 이용하여 새로운 디지털 컴퍼스 장치를 개발하였다. 그리고 기존 자차측정 방법과 달리 선박의 선회 없이 자동으로 자차의 분석과 수정이 가능하도록 기존 자차이론에 칼만필터 개념을 접목시킨 새로운 자차수정 이론을 제안하였다. 개발한 디지털 컴퍼스와 제안한 자차수정 방법의 유효성을 실습선 '세누리호'를 이용한 성능평가 실험을 통하여 유효성을 검증하였다.

**핵심용어** : 자기 컴퍼스, 디지털 컴퍼스, 자차측정, 자차수정, 자차갱신

**Abstract** : The ultimate target of this study is to develop ship's Digital Compass that can substitute for conventional ship's Magnetic Compass. At first, a new Digital Compass system consisting of three-axis Flux-gate sensors and small sized step motor was developed. Then, new deviation adjustment theory incorporating with Kalman filter method was proposed through which automatic deviation analysis and correction are obtainable without ship's swinging procedures. The effectiveness of developed Digital Compass and proposed deviation adjustment theory are verified throughout the performance evaluation tests on the training ship 'SAE-NU-RI'.

**Key words** : Magnetic compass, Digital compass, Deviation analysis, Deviation correction, Deviation renewal

### 1. 서 론

최근 선박 항해장비의 첨단화로 아날로그(Analog) 장비가 점차 디지털(Digital) 장비로 바뀌고 있다. 특히, 오랜 기간동안 방위측정 장비로 사용되고 있는 자기 컴퍼스(Magnetic Compass)는 점차 디지털 장치로 대체되고 있는 실정이다(임·윤, 2003).

개정된 SOLAS 2000 규정에 의하면 자기 컴퍼스에 자차수정을 충분히 행한 후, 선수 방위신호를 전기신호로 전달하는 선수방위전달장치(Transmitting Magnetic Heading Devices)의 장착이 권고되고 있으며, 2002년 7월부터 건조되는 선박은 자기 컴퍼스를 대신하여 전자 컴퍼스(Electronic Compass)가 제2차 방위측정 장치로 설치 될 수 있도록 규정하고 있다(IMO-MS-C.86(70)). 또한 이러한 시대적 요구에 따라서 한국(이 등, 1986; 임, 2002a; 임 등, 2002b), 영국(Kelvin Hugh, 2004), 일본(Furuno, 2004), 노르웨이(Kongsberg, 2004), 미국(PNI, 2004) 등 전 세계적으로 유명한 항해장비 생산업체에서 전자 컴퍼스를 개발하여 시판하고 있다.

그러나 전자 컴퍼스 역시 기존 자기 컴퍼스와 마찬가지로 지구자기의 방향성분을 이용하여 방위를 획득하기 때문에 선체자기(Ship's Magnetism)가 지구자기에 미치는 자차

(Deviation)와 지구상의 위치에 따라서 지구자기 성분이 변하는 편차(Variation)를 보정해야 정확한 방위를 측정할 수 있다. 여기서, 편차는 지구상의 선박 위치를 알고 있으면 다양한 방법으로 정밀 측정이 가능하다. 그러나 자차는 선박의 연철(Soft Iron) 성분이 선박의 선수방위 변화나, 화물의 적하와 양하, 항해환경의 변화, 시간경과 등에 따라서 수시로 변하기 때문에 측정이 어렵고 번거롭다(Hine, 1968).

기존 자기 컴퍼스의 경우에는 선박을 360도 선회시켜서 그때 발생하는 강철(Hard Iron) 성분과 연철 성분에 의한 선체 자기의 변화를 측정하여 자차를 구하는 원표방위법이 일반적으로 적용되고 있다. 이러한 원표방위법은 선박을 정선시킨 후 선회시켜야 하고, 선회에 필요한 안전하고 넓은 해역이 필요하며, 자차 측정에 시간이 소요되고, 환경변화에 따라서 수시로 자차를 수정해야하는 등, 많은 문제점을 갖고 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 이러한 선회방법 이외에 자차를 측정하기 위한 다른 대안이 없는 실정이다. 현재, 전자 컴퍼스는 기존 자기 컴퍼스와 비교하여 정밀도, 가격, 내구성 등에서 매우 우수하다. 그러나 전자 컴퍼스 역시 자기 컴퍼스와 마찬가지로 선회방법 이외에는 자차측정에 대한 대안이 없기 때문에 기존 자기 컴퍼스를 대체하지 못하고 있는 실정이다(임·심, 2005a).

\* 대표저자 : 임정빈(중신회원), jbyim@mmu.ac.kr 061)240-7051

이 연구에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 디지털 컴퍼스를 개발하고자 한다. 이 연구는 선행연구로서 이·임(1986)에 의하여 원격으로 자기 컴퍼스의 방위를 획득하기 위한 연구를 시작으로, 임 등(2002a; 2002b)에 의하여 2채널 링-코어 프릭스 게이트 컴퍼스(Two-channel Ring-core Flux-gate Compass)를 개발한 바 있다. 그리고 임(2005a)에 의하여 선박을 선회시키지 않고 간단히 자차를 획득할 수 있는 기초연구를 진행한 바 있으며 임·심(2005b)에 의하여 고등방성 자성체를 이용한 공진형 마그네토미터(Resonant-type Magnetometer)를 개발하여 3축의 전자 컴퍼스를 개발한 바 있다.

이러한 선행연구결과를 토대로, 이 연구에서는 선박을 선회시키는 대신 자기 센서를 회전시켜서 고정된 방위에서의 자차계수를 획득한 후, 항해 중 자차계수가 자동으로 갱신되는 칼만 필터(Kalman Filter) 개념(Brown·Hwang, 1997)의 디지털 컴퍼스를 구현하였다. 이를 위하여 스텝 모터를 이용한 새로운 형태의 회전식 디지털 컴퍼스 장치를 구축하였고, 자동으로 자차계수를 갱신할 수 있는 이론식과 알고리즘을 개발하였다. 그리고 구축한 디지털 컴퍼스 장치는 목포해대 실습선 '새누리호'에서 실선 실험을 통하여 그 유효성을 평가하였다.

## 2. 이론 개발

### 2.1 자기외란 보정 개념

다음 Fig. 1은 X-Y-Z 좌표에 나타낸 지구자기 성분으로서, Hx는 X축의 지구자기 성분, Hy는 Y축의 지구자기 성분, Hz는 Z축의 지구자기 성분을 각각 나타낸다. 지구자기를 이용한 방위측정 장비의 경우에는 X-Y 평면에서의 Hx와 Hy의 비례관계로 나타나는 자북(Magnetic North) Hnorth을 정확하게 측정하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 지구자기에 가해지는 자기외란(Magnetic Disturbance)을 보정해야한다.

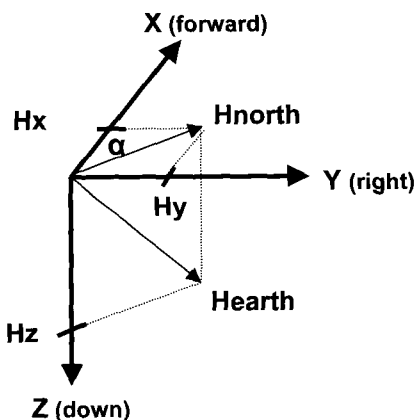


Fig. 1 Azimuth defined in the X-Y-Z plane

Fig. 1의 좌표계에서 Hx, Hy, Hz에 자기외란이 가해지는 경우 이를 보정하기 위한 공식은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Graven·Kenny, 2004).

$$M_j = \begin{Bmatrix} mx_j \\ my_j \\ mz_j \end{Bmatrix} = P T_j B_j + v_j \quad (1)$$

여기서,  $M_j$ :  $j$ 번째 측정된 지구자기 벡터,  $mx_j, my_j, mz_j$ :  $j$ 번째 측정된 각 Hx, Hy, Hz의 성분 벡터,  $P$ : 3×3의 보정 변수,  $T_j$ :  $j$ 번째 측정시 자기센서 자세에 대한 3×3의 직교회전 매트릭스,  $B_j$ :  $j$ 번째 측정된 지구자기장 벡터의 참값,  $v_j$ :  $j$ 번째 측정시의 측정잡음 벡터.

위의 식(1)에서 최종 목표는 지구자기장 벡터의 참값  $B_j$ 를 정밀하게 측정하는 것인데, 칼만 필터 이론에 의하면 대단히 복잡한 매트릭스 변환 알고리즘이 요구되기 때문에 계산량이 방대하여 하드웨어 구성이 복잡해지는 문제점이 발생한다(Brown·Hwang, 1997).

그래서 이 연구에서는 포아송(Poisson) 방정식으로부터 유도되는 자차계수를 이용한  $B_j$  측정방법을 제안하였다. 이 방법은 기존 자차측정시의 선회방법과 달리 자기센서를 선회시켜서 일정한 선수 방위에서의 자차를 측정된 후, 이를 지속적으로 갱신할 수 있기 때문에 선박선회에 따른 다양한 문제점들을 극복할 수 있다.

### 2.2 t=0에서의 자차계수

우선, 선박이 정박 중이거나 항해 중 일정한 침로를 유지하고 있을 경우, 짧은 시간(이 논문에서는 짧은 시간의 의미를 t=0로 표시함)에 자기센서를  $i$ 의 스텝(Step)으로 360도 회전시키고 이를  $j$ 회 반복하여  $mx_{ij}, my_{ij}, mz_{ij}$ 을 측정한다.

그리고  $j$ 회 측정 시  $i$ 의 스텝에서 발생하는 자기센서의 롤링(Rolling)  $\rho_{ij}$ 과 피칭(Pitching)  $\phi_{ij}$ 을 동시에 측정하여 자기센서의 자세변화가 보정된  $mx'_{ij}$ 와  $my'_{ij}$ 을 다음 식(2)으로 구한다.

$$\left. \begin{aligned} mx'_{ij} &= mx_{ij} \cos \phi_{ij} + my_{ij} \sin \rho_{ij} \sin \phi_{ij} \\ &\quad - mz_{ij} \cos \rho_{ij} \sin \phi_{ij} \\ my'_{ij} &= my_{ij} \cos \rho_{ij} + mz_{ij} \sin \rho_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서,  $i=1, 2, \dots, N_1$  ( $N_1$ : 360도에 대한 스텝 수),  $j=1, 2, \dots, N_2$  ( $N_2$ : 반복측정 횟수),  $\phi_{ij}$ :  $i$ 의 스텝에 대해서  $j$ 회 반복시의 피칭,  $\rho_{ij}$ :  $i$ 의 스텝에 대해서  $j$ 회 반복시의 롤링.

위의 식(2)의 결과를 다음 식(3)과 같이  $i$ 의 스텝에 대한  $j$ 회 평균값을 구하여 위의 식(1)의 측정잡음  $v_j$ 을 최소화 시키고,

$$\left. \begin{aligned} mx_i &= \frac{\sum_{j=1}^{N_2} mx'_{ij}}{N_2} \\ my_i &= \frac{\sum_{j=1}^{N_2} my'_{ij}}{N_2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$i$ 의 스텝에 대한  $t=0$ 에서의 나침방위  $h_{C_i}^{t_0}$ 을 다음 식(4)으로 구한다.

$$h_{C_i}^{t_0} = \tan^{-1}\left(\frac{\overline{my}_i}{\overline{mx}_i}\right) \quad (4)$$

다음에는 위의 식(3)의  $\overline{mx}_i$ 와  $\overline{my}_i$ 에 각각 가해진 자기 외란의 크기  $S_x, S_y$ 와 자기외란의 편이  $O_x, O_y$ 을 다음 식(5)과 식(6)으로 구한다.

$$\left. \begin{aligned} S_x &= 1 \text{ or } \frac{\max(\overline{my}_i) - \min(\overline{my}_i)}{\max(\overline{mx}_i) - \min(\overline{mx}_i)} \\ S_y &= 1 \text{ or } \frac{\max(\overline{mx}_i) - \min(\overline{mx}_i)}{\max(\overline{my}_i) - \min(\overline{my}_i)} \end{aligned} \right\} \text{whichever is greater} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} O_x &= \frac{\max(\overline{mx}_i) - \min(\overline{mx}_i)}{2} - \max(\overline{mx}_i)S_x \\ O_y &= \frac{\max(\overline{my}_i) - \min(\overline{my}_i)}{2} - \max(\overline{my}_i)S_y \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

그리고  $S_x, S_y, O_x, O_y$  등을 다음 식(7)과 같이  $\overline{mx}_i$ 와  $\overline{my}_i$ 에 적용하여  $i$ 의 스텝에 대한  $t=0$ 에서의 자침방위  $h_{M_i}^{t_0}$ 을 구한다.

$$h_{M_i}^{t_0} = \tan^{-1}\left(\frac{\overline{my}_i S_y - O_y}{\overline{mx}_i S_x - O_x}\right) \quad (7)$$

다음에는 위의 식(4)의 나침방위  $h_{C_i}^{t_0}$ 와 위의 식(7)의 자침방위  $h_{M_i}^{t_0}$  사이의 차로 구해지는 자차  $Dev_i^{t_0}$ 을 다음 식(8)으로 계산한다.

$$Dev_i^{t_0} = h_{C_i}^{t_0} - h_{M_i}^{t_0} \quad (8)$$

위의 식(8)의  $Dev_i^{t_0}$ 을 다음 식(9)의 포아송 공식에 의해 유도되는 자차실용공식에 적용하여  $i$ 의 스텝에 대한  $t=0$ 에서의 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ (또는 그 이상)의 계수를 구한다.

$$\left. \begin{aligned} A^{t_0} &= \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_0} \\ B^{t_0} &= \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_0} \sin h_{C_i}^{t_0} \\ C^{t_0} &= \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_0} \cos h_{C_i}^{t_0} \\ D^{t_0} &= \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_0} \sin 2h_{C_i}^{t_0} \\ E^{t_0} &= \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_0} \cos 2h_{C_i}^{t_0} \\ F^{t_0} &= \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_0} \sin 3h_{C_i}^{t_0} \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

위에서 구한  $Dev_i^{t_0}$ 은 실시간 자차계수 갱신에 적용하기 위하여  $i$  스텝의  $h_{C_i}^{t_0}$  위치에 다음 식(10)과 같이 저장한다.

$$P(i, h_{C_i}^{t_1}) \Leftarrow [Dev_i^{t_0}] \quad (10)$$

### 2.3 t=1에서의 실시간 자차계수 갱신

선박의 선수방위나 선박의 위치, 화물의 적하와 양화, 해양 환경 등 선체자기에 영향을 주는 변화가 발생하는 경우,  $t=0$ 에서 획득한 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ 는  $t=1$ 이후부터 실시간으로 검출하여 새로 갱신해야 한다.

$t=1$ 에서 실시간으로 측정된 X축의 지구자기 성분을  $mx^{t_1}$ 로 두고, Y축의 지구자기 성분을  $my^{t_1}$ 로 둔다. 먼저, 위의 식(2)과 마찬가지로  $t=1$ 에서의 선박의 롤링과 핏칭에 의한 자기센서의 자세변화를 다음 식(11)과 같이 적용하여  $mx'^{t_1}$ 와  $my'^{t_1}$ 을 구한다.

$$\left. \begin{aligned} mx'^{t_1} &= mx^{t_1} \cos \phi^{t_1} + my^{t_1} \sin \rho^{t_1} \sin \phi^{t_1} \\ &\quad - mz^{t_1} \cos \rho^{t_1} \sin \phi^{t_1} \\ my'^{t_1} &= my^{t_1} \cos \rho^{t_1} + mz^{t_1} \sin \rho^{t_1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

그리고  $t=1$ 에서의 나침로  $C_C^{t_1}$ 을 다음 식(12)으로 구한다.

$$C_C^{t_1} = \tan^{-1}\left(\frac{my'^{t_1}}{mx'^{t_1}}\right) \quad (12)$$

그리고 앞의 식(9)에서 구한  $t=0$ 에서의 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ 을 이용하여  $t=1$ 에서의 나침로  $C_C^{t_1}$ 에 대한 자차  $Dev^{t_0}$ 을 구한다. 여기서  $Dev^{t_0}$ 은  $t=0$ 에서의 자차계수를 이용한  $t=1$ 에서의 자차를 의미한다.

$$Dev^{t_0} = A^{t_0} + B^{t_0} \sin C_C^{t_1} + C^{t_0} \cos C_C^{t_1} + D^{t_0} \sin 2C_C^{t_1} + E^{t_0} \cos 2C_C^{t_1} + F^{t_0} \sin 3C_C^{t_1} + \dots \quad (13)$$

자차계수의 갱신을 위하여 위의 식(12)와 식(13)에서 구한  $C_C^{t_1}$ 와  $Dev^{t_0}$ 을 다음 식(14)와 식(15)와 같이  $t=0$ 에서 구한 나침방위  $h_{C_i}^{t_0}$ 와 나침로  $C_C^{t_1}$ 의 차이가 최소가 되는 위의 식(10)에서  $P$  위치의  $h_{C_i}^{t_0}$ 와  $Dev_i^{t_0}$ 과의 값으로 교체한다.

$$h_{C_i}^{t_01} \Leftarrow C_C^{t_1} | P[\min(h_{C_i}^{t_0} \sim C_C^{t_1})] \quad (14)$$

$$Dev_i^{t_01} \Leftarrow Dev^{t_0} | P[\min(h_{C_i}^{t_0} \sim C_C^{t_1})] \quad (15)$$

위의  $h_{C_i}^{t_01}$ 와  $Dev_i^{t_01}$ 을 이용하여  $t=1$ 에서 갱신된 자차계수  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ 을 다음 식(16)으로 구한다.

$$\left. \begin{aligned} A^{t_1} &= \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_{01}} \\ B^{t_1} &= \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_{01}} \sin h_C^{t_{01}} \\ C^{t_1} &= \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_{01}} \cos h_C^{t_{01}} \\ D^{t_1} &= \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_{01}} \sin 2h_C^{t_{01}} \\ E^{t_1} &= \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_{01}} \cos 2h_C^{t_{01}} \\ F^{t_1} &= \frac{2}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Dev_i^{t_{01}} \sin 3h_C^{t_{01}} \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

t=0에서의 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ 와 t=1에서 갱신된 자차계수  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$  사이의 변화 값은 다음 식(17)으로 구할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \Delta A^{t_1} &= A^{t_0} \sim A^{t_1}, \quad \Delta B^{t_1} = B^{t_0} \sim B^{t_1}, \\ \Delta C^{t_1} &= C^{t_0} \sim C^{t_1}, \quad \Delta D^{t_1} = D^{t_0} \sim D^{t_1}, \\ \Delta E^{t_1} &= E^{t_0} \sim E^{t_1}, \quad \Delta F^{t_1} = F^{t_0} \sim F^{t_1}, \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

다음에는 t=1에서 갱신된 자차계수  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ 을 이용하여 t=1에서의 자차  $Dev^{t_1}$ 을 다음 식(18)으로 구한 후,

$$\begin{aligned} Dev^{t_1} &= A^{t_1} + B^{t_1} \sin C_C^{t_1} \\ &\quad + C^{t_1} \cos C_C^{t_1} + D^{t_1} \sin 2 C_C^{t_1} \\ &\quad + E^{t_1} \cos 2 C_C^{t_1} + F^{t_1} \sin 3 C_C^{t_1} + \dots \end{aligned} \quad (18)$$

t=1에서의 자침로  $M_C^{t_1}$ 을 다음 식(19)으로 구하고,

$$M_C^{t_1} = C_C^{t_1} \sim Dev^{t_1}, \quad (19)$$

다음 식(20)과 같이 t=1 위치에서의 편차  $Var^{t_1}$ 을 보정하여 진침로  $T_C^{t_1}$ 을 구한다.

$$T_C^{t_1} = M_C^{t_1} \sim Var^{t_1} \quad (20)$$

위의 식(11)~식(20)이 t=1에서 획득한 나침로  $C_C^{t_1}$ 에 자차계수  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ 을 적용하여 진침로  $T_C^{t_1}$ 을 계산하는 과정이다. t=2 이후부터의 나침로  $C_C^{t_2}$  획득과, 자차계수  $A^{t_2} \sim F^{t_2}$ 의 계산 및 진침로  $T_C^{t_2}$ 의 획득은 위의 식(11)~식(20)을 반복하여 행한다.

### 3. 디지털 컴퍼스 개발

#### 3.1 디지털 컴퍼스 장치의 설계

위에서 기술한 t=0에서의 자차계수 획득과 t=1 이후부터의

진방위 계산 과정을 적용하기 위하여 Fig. 2와 같은 디지털 컴퍼스 장치를 설계하였다.

Fig. 2의 위에서부터 아래로 설명하면 다음과 같다. 지구자기를 측정하는 센서와 신호처리 장치 등으로 구성된 디지털 컴퍼스(Digital Compass)는 외부 환경으로부터 보호하기 위하여 두께 0.1cm의 에폭시 수지(Epoxy Resins)로 제작된 상부 덮개(Upper Case)와 하부 덮개(Lower Case)의 가운데에 장착하였다. 디지털 컴퍼스는 스텝 모터(Step Motor)로 회전시키고, 회전이 부드럽도록 디지털 컴퍼스 하부에 볼 베어링(Ball Bearing)을 설치하였다. 그리고 디지털 컴퍼스의 신호선(Signal Lines)들이 자유롭게 회전하면서 신축될 수 있도록 케이블 홀더(Cable Holder)를 상부 패널에 설치하였다. 상부 패널은 디지털 컴퍼스 부분을 지지할 수 있는 가벼우면서 튼튼한 두께 0.5cm의 합성목재 패널(Panel)로 제작하였다. 스텝 모터와 볼 베어링 사이는 지지 튜브(Supporting Tube)로 연결하고 양 쪽 끝은 상하 신축이 가능하도록 접속 핀(Connecting Pin)으로 연결하였다. 그리고 중앙 패널(Middle Panel) 역시 두께 0.5cm의 합성목재 패널로 제작하고, 케이블 홀더를 설치하여 각종 신호선들이 신호 및 제어 유닛(Signal & Control Unit)에 접속되도록 하였다. 마지막으로, 제일 하부에는 삼각 지지대에 설치할 수 있는 테이블 설치대(Table Pod for Supporting Legs)를 장착하여 선체로부터 디지털 컴퍼스가 1m~2m 이격될 수 있도록 하였다.

여기서, 삼각 지지대는 선박 내 임의의 장소에서 Fig. 2의 장치를 실험하기 위한 것으로, 실제 사용할 때는 Fig. 2의 장치만을 선박의 일정한 장소에 고정 설치하게 된다. 이러한 경우 선박의 롤링과 피칭에 대한 프릭스-게이트 센서의 출력신호 보정이 필요하다. 본 연구에서 제작한 디지털 컴퍼스는 이러한 선박 황요경사를 보정하기 위한 경사센서와 미국 PNI사의 소형 마이크로프로세서 PNI-11096를 내장시켜 센서 경사에 대한 보정을 처리하도록 설계되어 있다(임, 2002a; 임 등, 2002b).

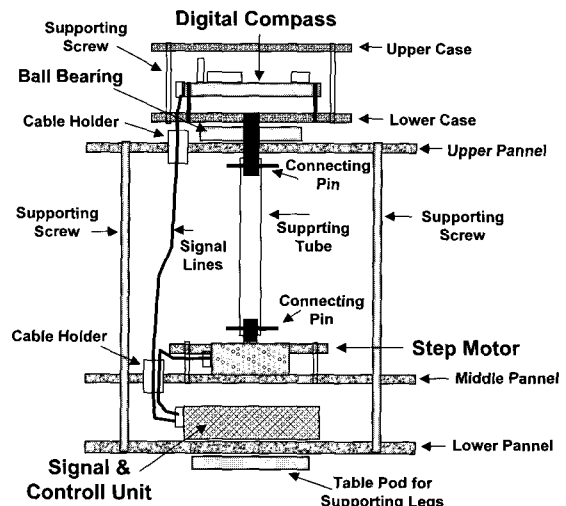


Fig. 2 The lay out of Digital Compass

3.2 디지털 컴퍼스의 설치

Fig. 3은 제작한 디지털 컴퍼스를 목포해대 실습선 ‘새누리호’(5천톤급, 길이 100m)의 후갑판에 설치한 모습이다. 실험 데이터의 분석을 위하여 모든 데이터는 노트북 컴퓨터에 저장하였다.

4. 실험 및 결과

4.1 t=0에서의 자차획득 결과

t=0에서의 측정실험은 2006년 3월 1일 0900시경 목포해대 실습선 ‘새누리호’가 부두에 정박해 있을 때 하였다. 실습선의 위치는 위도 34° 47.4′ N, 경도 126° 21.8′ E이고, 해도에서 구한 편차는 6° 47′ W이다. 이 때 기상은 약간 흐린 날씨에 간간히 비가 내렸으며, 기온은 영상 7도로서 추웠으며 약간의 바람이 불었다.

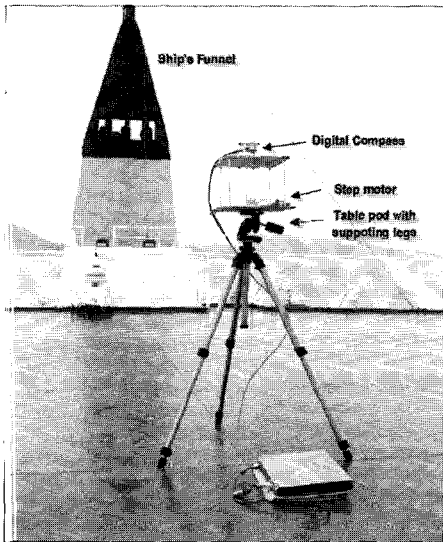


Fig. 3 Digital Compass set-up in the training ship "SAE-NU-RI".

우선, 위의 Fig. 3과 같이 실습선 후갑판에 디지털 컴퍼스를 0.1도 스텝으로 20회 이상 반복하여 360도 회전 시키면서 각 스텝에 대한 X축, Y축, Z축 등의 지구자기 요소를 측정하였다. 측정된 지구자기 요소는 -30 $\mu$ Tesla~+30 $\mu$ Tesla에 분포하였다.

Fig. 4는 각 스텝마다 측정된 X축과 Y축 지구자기 요소를 그래프의 x축과 y축에 각각 대응하여 표시한 것이다. Fig. 4의 경우 자기외란이 없고, 자기센서가 360도 회전할 때 X-Y 수평면에 정렬되는 이상적인 경우, 그래프는 반경이 일정한 원으로 나타나게 된다.

Fig. 4의 A는 어떠한 보정도 가하지 않은 원시 데이터를 나타내고, B는 센서의 자세변화를 보정한 결과이며, C는 자기외란의 크기와 자기외란의 편이를 적용하여 보정한 결과이다. 원시 데이터에 보정을 가함으로써 점차 반경이 일정한 원의

형태로 나타남을 알 수 있다. 한편, Fig. 4의 우측 아래 부분에 데이터의 불규칙이 나타나는데, 이 것은 스텝 모터가 X-Y 평면에 대해서 균일하게 회전하지 못한 결과이다. 이러한 불규칙이 발생 하더라도 경사센서를 이용하여 데이터를 보정하였고, 이 연구에서 제안한 방법은 X축과 Y축 지구자기 요소의 비례 관계를 이용하기 때문에 실험 결과에는 영향을 주지 않는다.

Fig. 5는 X축과 Y축 지구자기 요소를 이용하여 방위를 계산한 것이다. Fig. 5의 그래프 A는 자기센서의 자세변화를 보정한 데이터를 이용하여 위의 식(4)으로 나침방위  $h_{C_i}^{t_0}$ 을 계산한 결과이고, 그래프 B는 외란의 크기와 편이를 보정하여 위의 식(7)으로 계산한 자침방위  $h_{M_i}^{t_0}$ 을 나타낸다. Fig. 5의 x축은 스텝  $i$ 을 나타내고, y축은 0도부터 360도까지의 방위를 나타낸다.

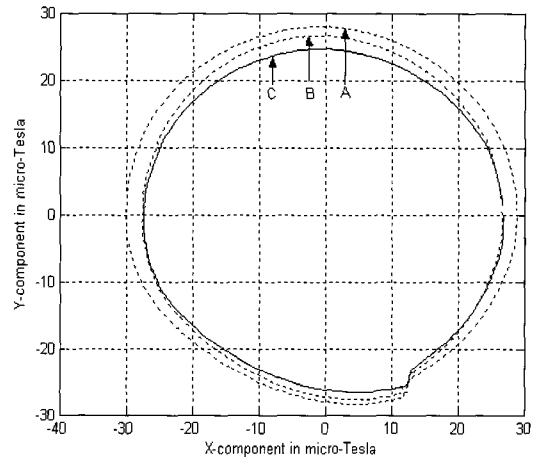


Fig. 4 X- versus Y-components at t=0. (A: Empirical components, B: Compensated components with rolling and pitching, C: Compensated components with scale factors and offset values)

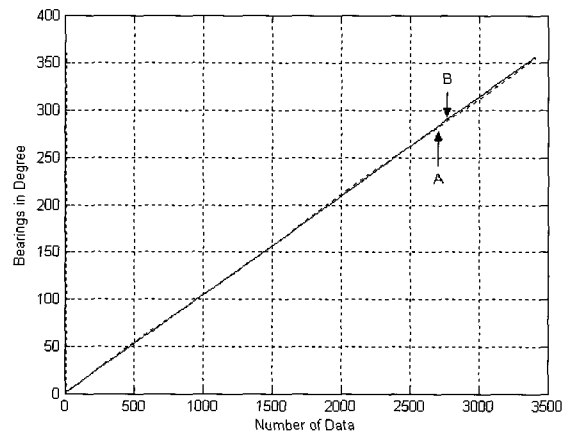


Fig. 5 Bearings with X- and Y-components. (A: Compass bearings  $h_{C_i}^{t_0}$  in eq.(4), B: Magnetic bearings  $h_{M_i}^{t_0}$  in eq.(7))

Fig. 5에서, 개발한 디지털 컴퍼스가 성공적으로 구축된 결과 360도 회전하면서 지구자기 요소를 획득함을 알 수 있고, 방위계산이 가능함을 알 수 있다. Fig. 5의 나침방위  $h_{C_i}^{t_0}$ 와 자침방위  $h_{M_i}^{t_0}$  사이의 차이는 Fig. 6의 그래프 A에 나타났다.

Fig. 6의 그래프 A는 Fig. 5의 나침방위(그래프 A)와 자침방위(그래프 B)사이의 차이로 계산한 자차  $Dev_i^{t_0}$ (위의 식(8))을 나타내고, 그래프 B는 위의 식(9)에서 구한 t=0에서의 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ 의 정밀도를 임시 확인하기 위하여 다음 식(21)과 같이 합성 자차  $Dev_i^T$ 를 구한 것이다. 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ 가 이상적으로 구해졌다면  $Dev_i^{t_0}$ 와  $Dev_i^T$  사이의 차이는 영(0)이 된다.

$$Dev_i^T = A^{t_0} + B^{t_0} \sin h_{C_i}^{t_0} + C^{t_0} \cos h_{C_i}^{t_0} + D^{t_0} \sin 2h_{C_i}^{t_0} + E^{t_0} \cos 2h_{C_i}^{t_0} + F^{t_0} \sin 3h_{C_i}^{t_0} + \dots \quad (21)$$

Fig. 6의 그래프 C에  $Dev_i^{t_0}$ 와  $Dev_i^T$  사이의 차이를 나타냈는데,  $\pm 0.1$ 도 이내로 형성되어 t=0에서 구한 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ 가 정확하게 분석되었음을 알 수 있다.

위의 Fig. 4부터 Fig. 6까지를 통하여 t=0에서의 지구자기 요소 측정과 자차의 분석 및 합성 등에 관한 이론과 방법이 유효함을 알 수 있다.

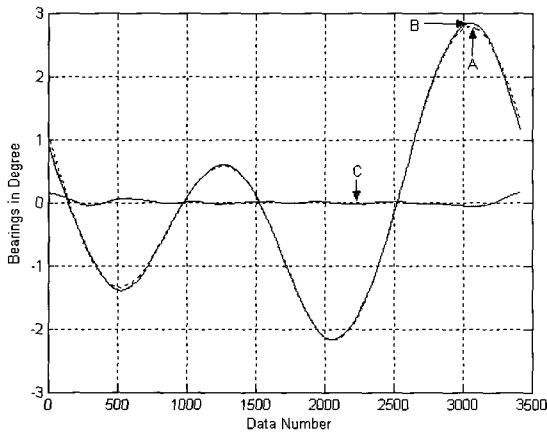


Fig. 6 Deviation analysis and synthesis. (A: Deviation analysis  $Dev_i^{t_0}$  in eq.(8), B: Deviation synthesis  $Dev_i^T$  in eq.(21), C: Residual errors between  $Dev_i^{t_0}$  and  $Dev_i^T$ )

#### 4.2 항해 중 t=1 이후의 자차계수 갱신 결과

t=0에서의 실험 조건과 동일한 2006년 3월 1일, 1000시부터 실습선 '새누리호'가 목포해대 부두에서 화원반도 입구까지 항해하는 기간 중 t=1이후부터의 실시간 자차계수 갱신실험을 하였다. 노트북 컴퓨터에 데이터를 저장하였고, 데이터가 방대하여 약 20분 간격으로 데이터를 분할 저장하였다.

Fig. 7은 항해 중 획득한 데이터를 이용하여 계산한 침로를 나타낸다. x축은 시간을 나타내고, y축은 방위를 나타낸다. 그래프 A는 위의 식(12)으로 계산한 나침로  $C_C^{t_1}$ 을 나타내고, 그래프 B는 위의 식(20)으로 계산한 진침로  $T_C^{t_1}$ 을 나타낸다. 그리고 G1005, G1010, G1015, G1020 등으로 나타낸 점들은 각각 1005시, 1010시, 1015시, 1020시에 측정된 자이로컴퍼스 침로를 나타낸다. Fig. 7 계산에 적용된 자차는 Fig. 8에 나타났다.

우선, Fig. 7에서 각 시각마다 자차가 실시간으로 갱신된 결과 나침로  $C_C^{t_1}$ 로부터 진침로  $T_C^{t_1}$ 가 획득 가능함을 알 수 있고, 획득한 진침로  $T_C^{t_1}$ 가 자이로컴퍼스 침로와 동일한 값을 나타내어 제안한 자차갱신 방법이 유효함을 알 수 있다. 여기서, 자이로컴퍼스 침로는 지정된 시간마다 선교에서 기록한 것이다. 자동으로 자이로컴퍼스 침로를 저장하려면 항해에 사용되는 자이로컴퍼스에 별도의 인터페이스를 부착해야 하는데, 이러한 경우 실습선 안전운항에 지장을 초래할 우려가 있어서 이 연구에서는 참고용으로 자이로컴퍼스 침로를 수작업으로 기록하였다.

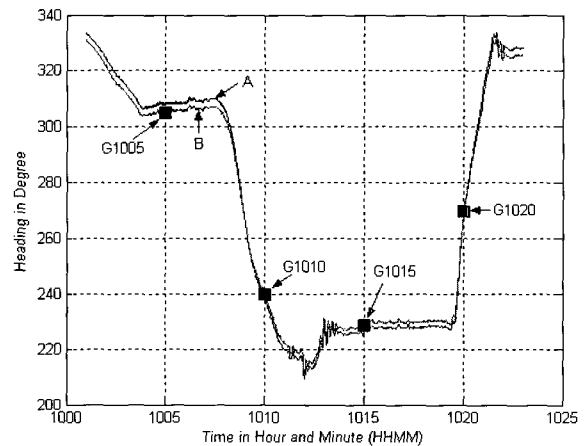


Fig. 7 Ship's courses at each time. (A: Compass course  $C_C^{t_1}$  in eq.(12), B: True course  $T_C^{t_1}$  in eq.(20), G1005, G1010, G1015, G1020: Gyrocompass courses at 1005Hr, 1010Hr, 1015Hr and 1020Hr)

Fig. 8은 Fig. 7의 침로계산에 적용된 자차를 나타낸다. Fig. 8의 그래프 A는 t=0에서의 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ (식(9))를 이용하여 각 시각마다의 나침로  $C_C^{t_1}$ 에 대한 자차  $Dev_i^{t_0}$ 을 구한 것이고, 그래프 B는 t=1이후의 각 시각마다 갱신한 자차계수  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ (식(16))을 이용하여 각 시각마다의 나침로  $C_C^{t_1}$ 에 대한 자차  $Dev_i^{t_1}$ 을 구한 것이다. 그래프 C는  $Dev_i^{t_0}$ 과  $Dev_i^{t_1}$  사이의 차를 나타낸다.

일단, Fig. 8로부터 1000시부터 1025분까지의 짧은 시간에서는 자차계수의 변화가 작게 나타나서 t=0에서 획득한 자차

계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ 을 이용한 자차와 t=1이후의 실시간 갱신된 자차계수  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ 을 이용한 자차 사이의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 자차계수 변동은 다음 Fig. 9에 상세히 기술한다.

한편, Fig. 7의 선박 침로를 보면 1000시부터 1025시까지 330도  $\rightarrow$  210도  $\rightarrow$  330도 등으로 변화했는데, 이에 따라서 Fig. 8의 자차 역시 +2.8도  $\rightarrow$  -2.1도  $\rightarrow$  +2.8도 등으로 선박의 침로 변화에 따라서 자차가 변하고 있다. 그 결과 Fig. 7과 같이 자차를 적용하여 획득한 진침로  $T_C^{t_1}$ 와 자이로컴퍼스 침로 사이의 오차가 영(0)으로 나타났다. 이러한 실험결과는 이 연구에서 제안한 자차획득과 갱신방법이 유효함을 나타낸다.

Fig. 9는 t=0에서의 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ 와 t=1이후 실시간으로 갱신한 자차계수  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$  사이의 차를 나타낸다. 각 그래프에 표시한 A부터 I까지의 기호는 위의 식(17)의  $\Delta A^{t_1}$ 부터  $\Delta F^{t_1}$ 까지를 나타낸다. 여기서, 자차계수는 선행 연구결과(임·심, 2005a)에 상세히 기술한 바와 같이, 자차계수의 크기는 상선의 경우 일반적으로 A, B, C 정도가 크고 D 이후부터는 작기 때문에 자기 컴퍼스의 자차수정에 A, B, C, D, E (또는 A, B, C)만 적용한다. Fig. 9의 결과에서도 자차계수 값의 절대 크기 순서로 A, B, C, D 등이 나타나고 있다.

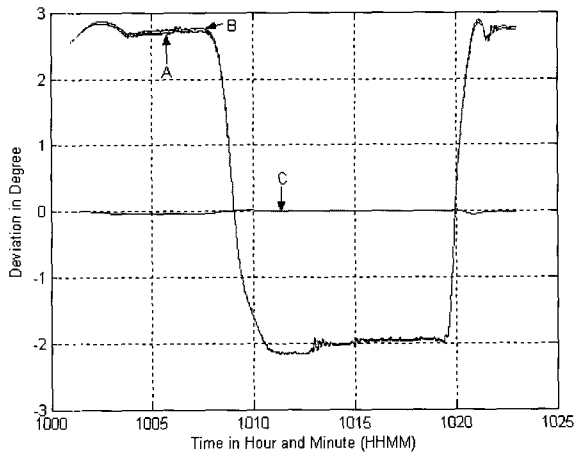


Fig. 8 Deviations at each time. (A: Deviation  $Dev^{t_0}$  with  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ , B: Deviation  $Dev^{t_1}$  with  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ , C: Differences between  $Dev^{t_0}$  and  $Dev^{t_1}$ )

Fig. 9에서, 시간경과에 따라서 t=1 이후의 자차계수들이 점차 갱신되어 자차계수 갱신이 시작된 후 5~10분 정도 경과되면 t=1 이후의 자차계수  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ 들이 점차 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 즉, 다양한 선박의 침로변화에 따라서 나타나는 자차계수들의 변화가 검출되었고, 그 결과 자차계수 갱신이 유효하게 적용되었음을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서 제안한 방법이 유효함을 알 수 있다.

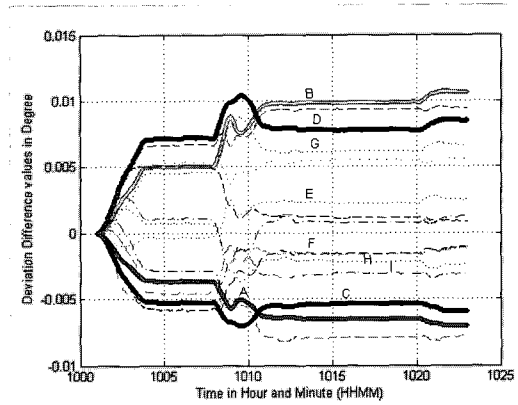


Fig. 9 The fluctuations of Deviation Coefficients through time lapse. (A~I: Difference values between  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$  and  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ )

다음의 Fig. 10부터 Fig. 12까지는 1024시부터 1042시까지의 실시간 향해 데이터에 대해서, 위의 Fig. 7부터 Fig. 9까지와 동일한 방법을 적용하여 계산한 결과들이다.

Fig. 10의 그래프 A는 각 시각마다의 나침로  $C_C^{t_1}$ 을 나타내고, 그래프 B는 각 시각마다의 진침로  $T_C^{t_1}$ 을 나타내며, G1025, G1030, G1035, G1040 등은 1025시, 1030시, 1035시, 1040시에 대한 자이로컴퍼스 침로이다. 위의 Fig. 7과 마찬가지로 진침로  $T_C^{t_1}$ 와 자이로컴퍼스 침로 사이에 오차가 없다.

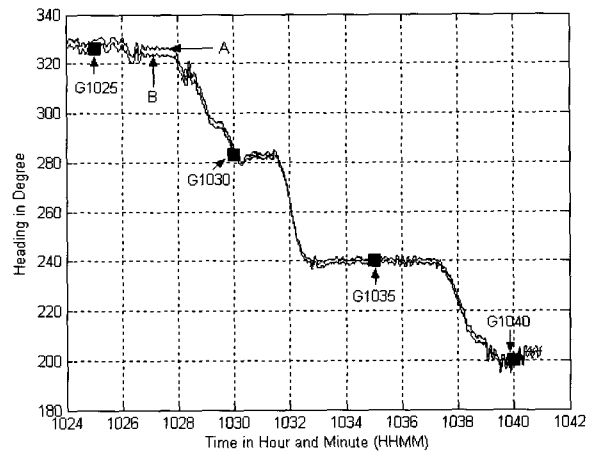


Fig. 10 Ship's courses at each time. (A: Compass course  $C_C^{t_1}$  in eq.(12), B: True course  $T_C^{t_1}$  in eq.(20), G1025, G1030, G1035, G1040: Gyrocompass courses at 1025Hr, 1030Hr, 1035Hr and 1040Hr)

Fig. 11의 그래프 A는 t=0에서의 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ (식(9))를 이용하여 각 시각마다의 나침로  $C_C^{t_1}$ 에 대한 자차  $Dev^{t_0}$ 을 구한 것이고, 그래프 B는 1024시 이후의 각 시각마다

다 갱신한 자차계수  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ (식(16))을 이용하여 각 시각마다의 나침로  $C_C^{t_1}$ 에 대한 자차  $Dev^{t_1}$ 을 구한 것이다. 그래프 C는  $Dev^{t_0}$ 과  $Dev^{t_1}$  사이의 차를 나타낸다.

위의 Fig. 10의 선박 침로를 보면 1024시부터 1042시까지 330도 → 240도 → 200도 등으로 변하였는데, 이에 따라서 Fig. 11의 자차 역시 +2.8도 → 0 → -2.1도 등으로 선박의 침로 변화에 따라서 자차가 변하고 있다. 그 결과 Fig. 10과 같이 자차를 적용하여 획득한 진침로  $T_C^{t_1}$ 와 자이로컴퍼스 침로 사이의 오차가 영(0)으로 나타났다.

Fig. 12는 Fig. 9와 마찬가지로 t=0에서의 자차계수  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ 와 t=1(1024시)이후 실시간으로 갱신한 자차계수  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$  사이의 차를 나타낸다. Fig. 9와 마찬가지로 다양한 선박의 침로변화에 따라서 나타나는 자차계수들의 변화를 검출하고, 그 결과 자차계수 갱신이 유효하게 적용되었음을 알 수 있다.

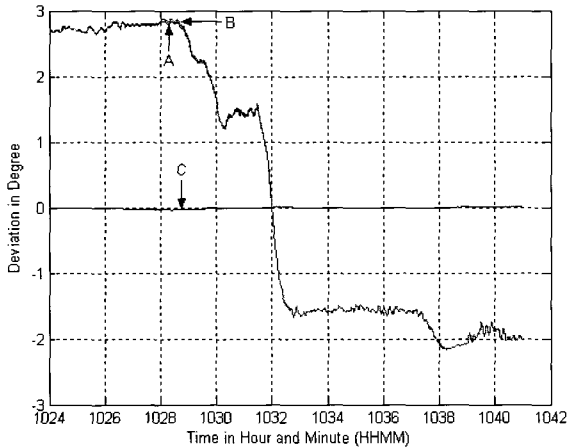


Fig. 11 Deviations at each time. (A: Deviation  $Dev^{t_0}$  with  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$ , B: Deviation  $Dev^{t_1}$  with  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ , C: Differences between  $Dev^{t_0}$  and  $Dev^{t_1}$ )

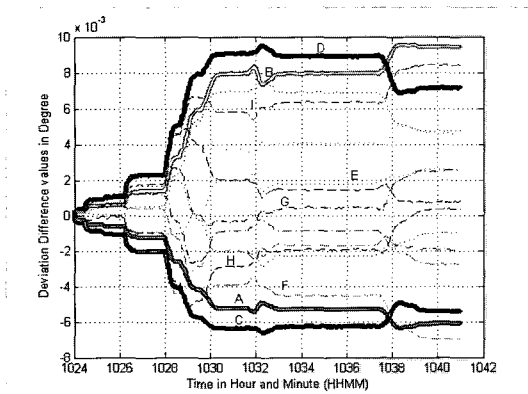


Fig. 12 The fluctuations of Deviation Coefficients through time lapse. (A~I: Difference values between  $A^{t_0} \sim F^{t_0}$  and  $A^{t_1} \sim F^{t_1}$ )

## 5. 결론

이 연구에서는 기존 자차수정 방법으로 적용되는 선박선회 방법의 문제점을 해결하기 위하여 스텝 모터가 장착된 디지털 컴퍼스를 설계 및 제작하고 새로운 자차수정 이론을 개발하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 포아송(Poisson) 공식에 기초한 자차계수의 분석과 합성을 이용하여 새로운 자차수정 방법을 제안하고, 제안한 방법의 유효성을 실선 실험을 통하여 확인하였다.

(2) 제안한 자차수정 방법은 칼만필터(Kalman Filter) 개념을 기반으로 과거 자차계수에 현재의 나침로를 적용하여 자차계수를 갱신하는 방법으로, 약 5~10분 시간경과 후에 자차계수가 일정한 값으로 수렴되는 안정된 특성을 나타냈다.

(3) 스텝 모터를 이용하여 디지털 컴퍼스를 회전시키는 새로운 전자 컴퍼스를 설계하고 제작하였다.

(4) 실선실험 결과, 디지털 컴퍼스를 이용하여 획득한 진침로는 자이로컴퍼스 침로와의 차이를 확인할 수 없을 정도로 정밀한 방위계산이 가능하였다.

향후 실제 항해에 적용될 수 있을 정도의 성능과 신뢰성을 확보하기 위하여 선체요동이 심할 때, 자기 남반부를 항해할 때 등과 같은 환경에서 실험하여 연구 보완할 예정이다.

## 후 기

“이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임”(KRF-2005-R05-2004-000-10760-0)

## 참고문헌

- [1] 이상집, 임정빈 (1986) “원격지시식 자기 Compass에 관한 연구 (I)”, 한국항해학회지, 제10권(제1호), pp.81-100.
- [2] 임정빈 (2002a), “2-채널 링-코어 플릭스 게이트 콤파스의 위상검출회로 설계와 구현에 관한 연구”, 한국항해항만학회지, 제26권(제1호), pp.127-136.
- [3] 임정빈, 정중식, 박성현, 김봉석 (2002b), “2-채널 링-코어 프릭스-게이트 콤파스의 성능평가 시스템 개발”, 한국항해항만학회지, 제26권(제5호), pp.529-535.
- [4] 임정빈, 윤명오 공저 (2003), “선박자동화”, 도서출판 오비, ISBN 89-950-7435-3.
- [5] 임정빈, 심영호 (2005b), “단일 자기침로에서의 자차계수 B와 C의 새로운 획득 방법”, 한국항해항만학회지, 제28권(제10호), pp.851-859.
- [6] 임정빈, 심영호, 안영섭 (2005b), “고투자율 등방성 자기 물질을 이용한 공진형 마그네토미터 개발”, 해양환경안전학회지, 제11권(제1호), pp.29-37.



임 정 빈

- [7] Brown, R. G. and Hwang, P. Y. C. (1997), "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering", John Wiley and Sons, Inc., pp.190-228.
- [8] Furuno (2004), "Fluxgate Compass C-500", <http://www.furuno.co.jp>.
- [9] Hine, A. (1968), "Magnetic Compasses and Magnetometers", Adam Hilger Ltd., Great Britain, pp.267-303.
- [10] Graven, P. and Kenny, T. (2004), "Laboratory Magnetometer Calibration Without Coil Facilities or Orientation Information", Stanford University, White paper.
- [11] IMO-MSC.86(70), "Annex 17, Adaptation of New and Amended Performance Standards for Navigational Equipment", IMO.
- [12] Kelvin Hugh (2004), "C100 Compass Engine", <http://www.kvh.com>.
- [13] Kongsberg (2004), "Simrad RFC35 Fluxgate Compass", <http://www.simrad.com>.
- [14] PNI (2004), "TCM2 Electronic Compass Module", <http://www.pnicorp.com>.
- 
- 원고접수일 : 2006년 4월 25일  
원고채택일 : 2006년 6월 12일