

論文

디지털 자기 컴퍼스의 자차와 편차 수정에 관한 연구

임정빈* · 람파드하사하**

*목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수, **목포해양대학교 대학원 석사과정

A Study on the Correction Method for Deviations and Variations of Digital Magnetic Compass

Jeong-Bin Yim* · Rampadha Saha**

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

**Graduate School of Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

ABSTRACT : To consider the practical use of a ship's Digital Compass in earth's magnetic field, high accurate Deviation and Variation are required to obtain ship's true bearing. Variation can be obtain with World Magnetic Model (WMM) using the Earth's spherical harmonic model of the main field and of the secular variation at any location around the earth. Deviation can be obtain with deviation analysis and synthesis method based on the Poisson equations. As results of deviation and variation corrections to the Digital Compass, high accurate true bearing is obtained. This experiments are carried out during in the navigation of training ship 'SAE-NU-RI'.

KEY WORDS : digital compass, geomagnetic field, variation, deviation, correction

요 약 : 선박용 디지털 컴퍼스를 사용하는 경우 선박의 진방위를 획득하기 위해서는 고정밀도의 자차와 편차가 필요하다. 편차는 지구자장의 주 자장과 경년변화에 대한 구면 지구 조화 모델을 이용한 WMM(World Magnetic Model)으로 예측 가능하였고, 자차는 포아송 방정식을 적용한 자차계수 합성과 분석 방법을 적용한 방법을 이용하여 획득 가능하였다. 실습선 '새누리호' 항해 중 디지털 컴퍼스에 편차와 자차를 가해진 결과 정확한 진방위 획득이 가능하였다.

핵심용어 : 디지털 컴퍼스, 지구자기장, 편차, 자차, 수정

1. 서 론

개정된 SOLAS 2000 규정에 의하면 자기 컴퍼스(Magnetic Compass)에 자차수정을 충분히 행한 후, 선수 방위신호를 전기 신호로 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)).

이러한 규정을 만족하기 위하여 국내외에서 전자 컴퍼스 개발 연구가 진행된 바 있는데, 한국(이.임, 1986; 임, 2002a; 임 등, 2002b), 영국(Kelvin Hugh, 2004), 일본(Furuno, 2004), 노르웨이(Kongsberg, 2004), 미국(PNI, 2004) 등이 대표적이다.

이러한 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 진방위를 구할 수 있다.

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). 최근 임-심(2005b)은 고등방성 자성체를 이용한 공진형 마그네토미터(Resonant-type Magnetometer)를 개발하여 3축의 전자 컴퍼스를 개발하면서 자차를 자동으로 측정할 수 있는 방법을 제안한 바 있다.

편차의 경우는 일반적으로 해도에 나타난 자차도(Compass Rose)에서 해당 지역의 값을 경년변화를 고려하여 수작업으로 구한 후 보정하는 방법이 일반적이다(이.임, 1986). 그러나 전자 컴퍼스의 경우는 시간경과에 따라 변하는 편차를 자

* 통신회원 : jbyim@mmu.ac.kr 061)240-7051

** 학생회원 : jbyim@mmu.ac.kr 061)240-7051

동으로 정밀 예측할 필요가 있다.

이 논문에서는 임심(2005b)에 의하여 개발된 디지털 컴퍼스에 자동으로 자차와 편차를 보정할 수 있는 기능을 부여하기 위한 연구로서, 자차와 편차 획득 방법과 이 방법을 디지털 컴퍼스에 적용한 결과에 대해서 기술한다.

2. 지구자장과 편차 예측

2.1 지구자장의 관측과 모델링

지구자장(Earth's magnetic field)은 일정하게 분포되어 있지 않으며 지구내부에 있는 코어(Core)의 외측에서 발생한다. 이러한 지구자장은 대기권에서 형성되는 다양한 외부자장과 혼합되어 지표면에 나타난다. 지구자장의 위치에 따른 변화를 편차(Variation)라 부르는데, 편차는 지구내부의 자장과 대기권에서 형성되는 자장을 장기간 관측함으로써 예측이 가능하다.

지구자장 B 는 공간 r 과 시간 t 에 따라서 변하는 벡터양으로 나타낼 수 있는데, 지표면에서 자기센서를 이용하여 측정된 지구자장은 다양한 소스(source)로부터 발생한 자장이 서로 혼합되어 있다. 지구자기 소스는, 지구 내부의 코어 주위에서 형성되는 주자장 B_m , 지표면이나 맨틀(mantle) 부근에서 발생하는 지각자장 B_c , 대기권에서 형성되는 외란자장 B_d 등으로 분류할 수 있다. 따라서 지구표면에서 관측한 지구자장은 다음 식(1)과 같다(S. McLean and S. Macmillan, 2005).

$$B(r, t) = B_m(r, t) + B_c(r) + B_d(r, t) \quad (1)$$

여기서 주자장 B_m 은 지구표면에서 95%이상을 차지하고, 경년편차(Secular variation)는 B_m 의 시간변화에 따라 나타난다. 지각의 암석이 자화되어 발생하는 지각자장 B_c 는 특별한 상황에서 변화하는데, B_c 는 B_m 과 비교할 때 대단히 작기 때문에 일정기간동안에는 고정된 값으로 고려할 수 있다. 그리고 우주에서 발생하는 외란자장 B_d 는 시간과 장소에 따라서 변한다. 항해에 적용할 목적으로 편차를 측정하는 경우, 전체 자장의 95% 이상을 차지하는 B_m 만을 고려할 수 있다. 현재 항해용 해도에 적용되는 편차는 미국해양대기국(NOAA)에서 개발한 WMM(World Magnetic Model)으로 예측한 것인데, WMM은 과거 장기간의 관측 데이터를 이용하여 5년간의 편차를 예측하기 위한 모델로서, B_m 만을 고려하고 있다.

위의 식(1)에서 B_c 는 수천 Km 이내에서 공간적으로 차이를 갖기 때문에 저차의 구면조화모델(spherical harmonic

model)로는 완전히 구현할 수 없다. 일반적으로 B_c 는 지상보다 해상에서 작고, 위도 증가에 따라 증가한다. 암석의 자화에 의한 B_c 의 경우에는 B_m 에 의하여 유도된 것이거나, 잔류(remnant)된 것 또는 이들 양자가 혼합된 형태로 나타날 수 있다. 또한 우주의 이온층이나 자기권(Magnetosphere)에 흐르는 유도전류 또는 이들이 혼합되어 지구에 유도되는 전류 등에 의한 외란자장 B_d 의 경우에는 장소와 시간에 따라서 변한다.

Fig. 1은 지구자장을 형성하는 이러한 전류 시스템의 변화를 나타내는데, 우주공간의 외란장은 일정하게 변하거나, 하루 또는 일년 등의 주기로, 또는 수초 또는 몇 일간 계속 변할 수 있다. 따라서 우주공간의 외란장을 모델링하는 것은 대단히 어려운 문제이다.

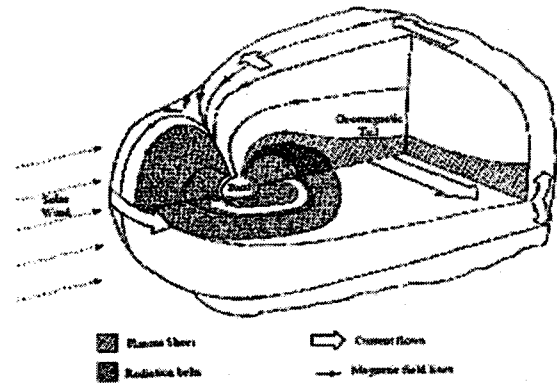


Fig. 1. Schematic of the magnetosphere showing the current flows and magnetic field lines(Nils Olsen, 2002)

2.2 지구자장 모델 변수

지구표면이나 위성위치에서 측정된 지구자장은 지구의 내외부에 있는 소스에서 발생한 자장의 합이다. 이러한 소스를 고려하지 않는 경우, 내부자장 B 는 퍼텐셜장(Potential field)이기 때문에 식(2)와 같이 스칼라 퍼텐셜 V 의 부그래디언트(Negative gradient)로서 나타낼 수 있다(S. McLean and S. Macmillan, 2005).

$$\begin{aligned}
 V = & a \left(\sum_{n=1}^{N_{MF}} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\vartheta + h_n^m \sin m\vartheta) \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \right. \\
 & \times P_n^m(\cos\theta) + \sum_{n=1}^{N_{SV}} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\vartheta + h_n^m \sin m\vartheta) (t - t_0) \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \\
 & \times P_n^m(\cos\theta) + \sum_{n=1}^2 \sum_{m=0}^n (q_n^m \cos m\phi + s_n^m \sin m\phi) \\
 & \times \left(\frac{r}{a} \right)^n P_n^m(\cos\theta) + RC \left[\left(\frac{r}{a} \right) + Q_1 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] \\
 & \left. \times [\tilde{q}_1^0 p_1^0(\cos\theta) + \tilde{q}_1^1 \cos\vartheta + \tilde{s}_1^1 \sin\vartheta] + p_1^1(\cos\theta) \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서 a 는 지구 평균반지름(6371.2km)이고, (r, θ, ϕ) 는 지구중심 좌표로서, r 은 지구중심까지의 거리, θ 는 여고도, ϕ 는 그리니치(Greenwich)로부터의 동경을 각각 나타낸다. $P_n^m(\cos\theta)$ 는 n 차 m 계의 조화 슈미트 반규격화 르장드르(associated Schmidt semi-normalized Legendre)를 나타낸다. 그리고 (g_n^m, h_n^m) 과 (q_n^m, h_n^m) 은 지구에 대한 내부와 외부 소스를 표현하는 가우스(Gauss) 계수를 각각 나타내는데, (g_n^m, h_n^m) 의 경우 모델의 시점 t_0 근처에서의 선형 경년변화를 나타낸다.

위의 식(2)의 수열을 전개하면 무한수열로 나타나지만, 실용적인 측면에서 일반적으로 $n = 10$ 또는 $n = 12$ 로 제한한다.

2.3 지구자장 예측절차

지구자장의 접선좌표에서 지구자장 B 는 다음과 같이 계산된다(White Paper, 2005).

$$V(r, \theta, \phi) = a \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta) \quad (3)$$

$$B_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} (n+1) \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta) \quad (4)$$

$$B_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} (n+1) \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) \frac{\partial P_n^m(\theta)}{\partial \theta} \quad (5)$$

$$B_\phi = \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} = \frac{-1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m (-g_n^m \sin m\phi + h_n^m \cos m\phi) P_n^m(\theta) \quad (6)$$

여기서,

$$g_n^m \equiv s_{n,m} g_n^m \quad (7)$$

$$h_n^m \equiv s_{n,m} h_n^m \quad (8)$$

그리고

$$s_{n,m} = \left[\frac{(2 - \delta_m^0)(n-m)!}{(n+m)!} \right] \frac{(2n-1)!!}{(n-m)!} \quad (9)$$

크로네커의 델타 함수(Kronecker delta)는 만약 $i = j$ 이면 $\delta_{ij} = 1$ 이고 그 외는 0이다.

또한, P_n^m 는 다음과 같이 정의된다.

$$P^{0,0} = 1 \quad (10)$$

$$P^{n,n} = \sin \theta P^{n-1,n-1} \quad (11)$$

$$P^{n,m} = \cos \theta P^{n-1,m} - k^{n,m} P^{n-2,m} \quad (12)$$

여기서,

$$k^{n,m} = \begin{cases} \frac{(n-1)^2 - m^2}{(2n-1)(2n-3)}, & n > 1 \\ 0, & n = 1 \end{cases} \quad (13)$$

이러한 예측절차가 WMM(National Geophysical Data Center, 2006)을 적용되어 있는데, WMM을 이용하면 지구자장 B 를 예측할 수 있고, 이에 수반하여 경년편차를 계산할 수 있기 때문에 해당 연도의 편차를 구할 수 있다.

3. 지구자장 측정과 자차측정

3.1 지구자장과 자차 측정

다음 Fig. 2는 X-Y-Z 좌표에 나타낸 지구자기 성분으로서, H_x 는 X축의 지구자기 성분, H_y 는 Y축의 지구자기 성분, H_z 는 Z축의 지구자기 성분을 각각 나타낸다. 지구자기를 이용한 방위측정 장비의 경우에는 X-Y 평면에서의 H_x 와 H_y 의 비례관계로 나타나는 자북(Magnetic North) H_{north} 을 정확하게 측정하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 지구자기에 가해지는 자기외란(Magnetic Disturbance)을 보정해야한다.

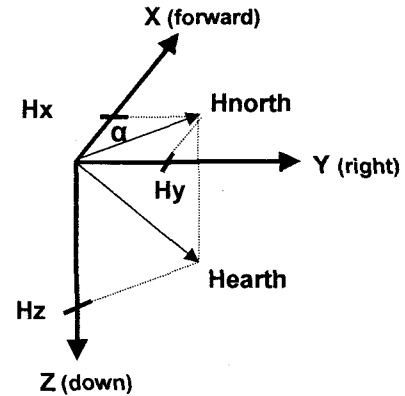


Fig. 2. Azimuth defined in the X-Y-Z plane

Fig. 2의 좌표계에서 H_x, H_y, H_z 에 자기외란이 가해지는 경우 이를 보정하기 위한 공식은 다음 식(14)로 나타낼 수 있다(Graven-Kenny, 2004).

$$M_j = \begin{bmatrix} mx_j \\ my_j \\ mz_j \end{bmatrix} = P T_j B_j + v_j \quad (14)$$

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

임심(2005b)은 위의 식(14)의 해법으로서 포아송(Poisson) 방정식으로부터 유도되는 자차계수를 이용한 B_z 측정방법과 자차측정 방법을 제안한 바 있다.

3.2 지구자장 측정장치

Fig. 3은 지구자장을 측정하기 위한 디지털 컴퍼스 장치의 설계도를 나타낸다. Fig. 3의 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 신호선 등이 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.

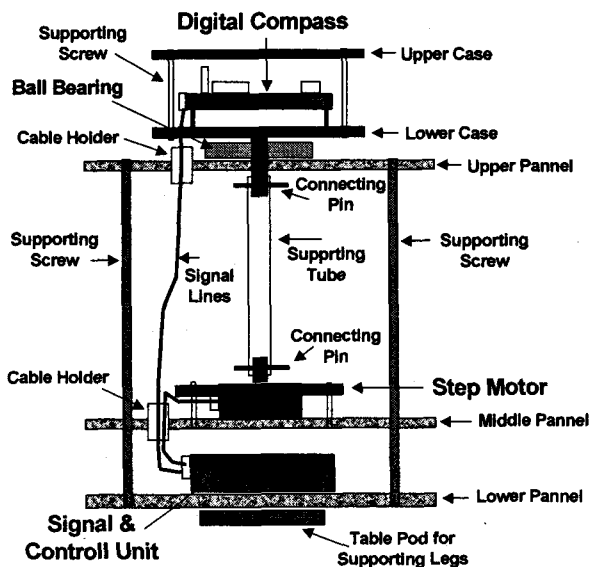


Fig. 3. The lay out of Digital Compass

Fig. 4는 제작한 디지털 컴퍼스를 목포해대 실습선 ‘새누리호’ (5천톤급, 길이 100m)의 후갑판에 설치한 모습이다. 실험 데이터의 분석을 위하여 모든 데이터는 노트북 컴퓨터에 저장하였다.

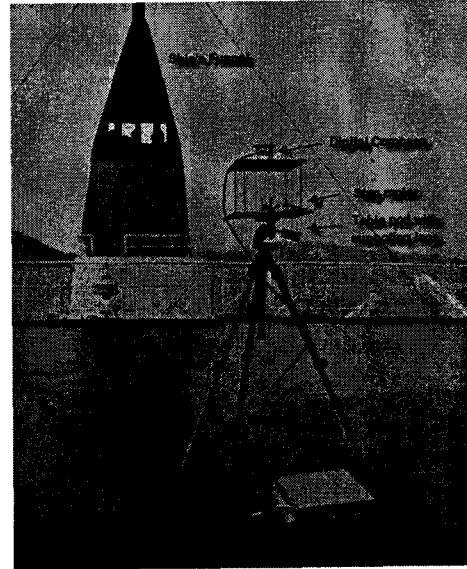


Fig. 4. Digital Compass set-up in the training ship "SAE-NU-RI"

4. 실험 및 결과

목포해양대학교 실습선 ‘새누리호’에서 Fig. 4와 같이 디지털 컴퍼스를 설치하여 자차와 편차 보정 실험을 하였다.

Fig. 5는 ‘새누리호’ 항해 중 10:02시부터 10:23시까지에 획득한 데이터를 이용하여 계산한 침로를 나타낸다. x축은 시간을 나타내고, y축은 방위를 나타낸다. 그래프 A는 아무런 보정도 가하지 않은 디지털 컴퍼스로 측정된 나침로를 나타내고, 그래프 B는 자차와 편차를 나침로에 적용하여 계산한 진침로를 나타낸다. 그리고 G1005, G1010, G1015, G1020 등으로 나타낸 점들은 각각 1005시, 1010시, 1015시, 1020시에 측정된 자이로컴퍼스로 측정된 침로를 나타낸다.

Fig. 5에서 각 시간마다 자차가 실시간으로 갱신된 결과 나침로(A 그래프)에서 진침로(B 그래프)가 획득 가능함을 알 수 있고, 획득한 진침로가 자이로컴퍼스 침로와 동일한 값을 나타내어 자차 및 편차 수정방법이 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.

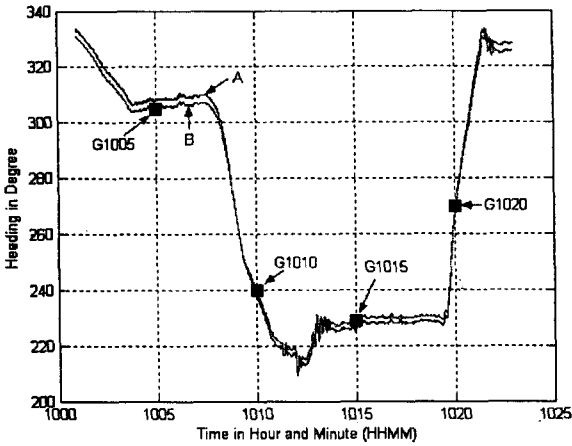


Fig. 5. Ship's courses at each time. (A: Compass course, B: True course, G1005, G1010, G1015, G1020: Gyrocompass courses at 1005Hr, 1010Hr, 1015Hr and 1020Hr)

Fig. 6는 10:24시부터 10:41시까지 획득한 데이터를 이용하여 계산한 침로를 나타낸다. 그래프의 의미는 Fig. 5와 동일하다. Fig. 6 역시 Fig. 5와 마찬가지로 자차와 편차를 가진 침로와 자이로컴퍼스 침로 사이에 오차가 없음을 알 수 있다.

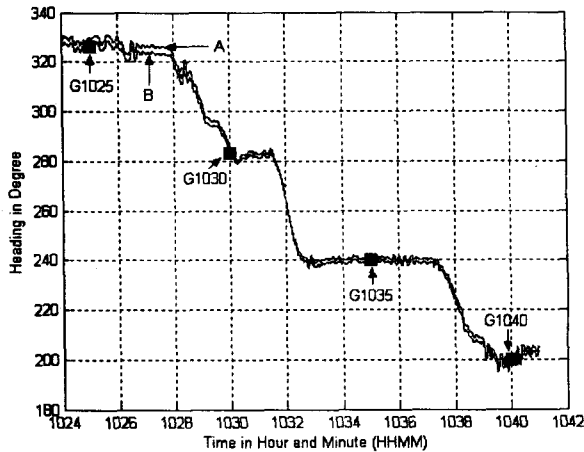


Fig. 6. Ship's courses at each time. (A: Compass course B: True course, G1025, G1030, G1035, G1040: Gyrocompass courses at 1025Hr, 1030Hr, 1035Hr and 1040Hr)

5. 결론

이 연구에서는 디지털 컴퍼스의 자차와 편차 보정에 관하여 기술하였다. 자차는 선체자기 특성에 기인하여 발생하는 것으로 이를 포아송 방정식을 적용한 자차분석과 합성 방법을 이용하여 획득할 수 있었으며, 편차는 WMM(World

Magnetic Model)을 이용하여 예측할 수 있었다.

현재, 자차와 편차를 전자 컴퍼스에서 자동으로 획득 및 적용할 수 있는 프로그램과 하드웨어를 설계하고 있다.

참고 문헌

- [1] 이상집, 임정빈(1986), "원격지시식 자기 Compass에 관한 연구(1)," 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 플릭스-게이트 콤파스의 성능평가 시스템 개발," 한국항해항만학회지, 제26권(제5호), pp.529-535
- [4] 임정빈, 심영호(2005b), "단일 자기침로에서의 자차계수 B와 C의 새로운 획득 방법," 한국항해항만학회지, 제28권(제10호), pp.851-859
- [5] 임정빈, 심영호, 안영섭(2005b), "고투자율 등방성 자기 물질을 이용한 공진형 마그네토미터 개발," 해양환경안전학회지, 제11권(제1호), pp.29-37
- [6] Hine, A.(1968), *Magnetic Compasses and Magnetometers*, Adam Hilger Ltd., Great Britain, pp.267-303.
- [7] Furuno(2004), *Fluxgate Compass C-500*, <http://www.furuno.co.jp>.
- [8] IMO-MS.C.86(70), Annex 17, *Adaptation of New and Amended Performance Standards for Navigational Equipment*, IMO.
- [9] Kelvin Hugh(2004), *C100 Compass Engine*, <http://www.kvh.com>.
- [10] Kongsberg(2004), *Simrad RFC35 Fluxgate Compass*, <http://www.simrad.com>.
- [11] Nils Olsen (2002), "A Model of the Geomagnetic Field and Its Secular Variation for Epoch 2000 Estimated from Orsted Data," *Geophys. J. Int.*Vol.149, pp.454-462.
- [12] National Geophysical Data Center (NGDC, 2006), <http://www.ngdc.noaa.gov/>
- [13] PNI(2004), *TCM2 Electronic Compass Module*, <http://www.pnicorp.com/>
- [14] S. McLean and S. Macmillan, *The US/UK World Magnetic Model for 2005-2006*
- [15] White Paper (2005), *Dipole Approximations of Geomagnetic Field*, <http://www.spennis.oma.be/>