

遠隔指示式 磁氣 Compass에 關한 研究(II)

李相鏞* · 鄭泰權**

The Research for Remote-indicating Magnetic Compass(II)

Lee Sang-jib · Jeong Tae-gweon

目 次

- | | |
|----------------------|--------------------|
| Abstract | IV. 總體的인 船體磁氣의 모델 |
| I. 緒 論 | V. 船體磁氣의 最小磁場位置 決定 |
| II. 地磁氣異常의 測定에 關한 理論 | VI. 結 論 |
| III. 船體磁氣의 實測 | |

Abstract

The sensing part of the remote-indicating magnetic compass has to be placed where the ship's magnetic effects are minimum, in order that the compass may remain usable under the varying magnetic conditions likely to be experienced on board the ship.

In this paper the model of the overall ship's magnetism is built using Vacquier's method frequently used in determining the geomagnetic anomaly, on the assumption that the steel ship generate the magnetic disturbance in the geomagnetic field. It was found that the values of the magnetism observed on board approximate to those of the magnetism calculated from the captioned model, under the condition that the ship's material is dominated by the permanent magnetism. And on the basis of the above model, it was feasible to locate the place of the minimum magnetic field by computer calculation.

I. 緒 論

船舶用 磁氣콤파스의 效用性を 높으려면 船體磁氣로 인한 自差가 修正되어야 한다. 그런데 自差實用公式에 따라 自差를 修正한다 하더라도 이 公式에 포함된 各係數를 精確하게 分析修正하기 困難하며 各修正具의 機能上 制約도 있으므로 숙련된 航海士가 자주 補完修正하여야 하는 번거로움

이 있다.¹⁾ 이러한 點을 해결하려면 船體磁氣의 영향이 最小가 되는 位置에 콤파스를 設置할 필요가 있다.

이 論文은 現在開發中인 遠隔指示式 磁氣콤파스의 感知部²⁾(sensing part)의 設置位置를 決定하는 要素로서 船體磁場의 세기가 最小인 點을 探索하는데 그 目的을 두었다.

接岸되어 있는 船舶의 船體磁氣를 부두에서 實

* 正會員, 韓國海洋大學

** 韓國海技研修院

測하고 局地的 地磁氣異常(geomagnetic anomaly)을 決定하는 方法³⁾을 도입하여 總體的인 船體磁氣를 모델化하는 方法을 제안하였으며 船上에서 實測한 船體磁氣와 모델에 의한 것을 비교하여 제안한 方法의 妥當性을 검토하였다. 그 다음 계산기 시뮬레이션을 통하여 船體磁場의 세기가 最小인 位置를 決定하였다.

이 論文에서는 基礎段階의 研究로서 다음과 같은 制限點을 두었다.

- ① 船體의 一時磁氣의 영향력은 永久磁氣의 그것에 비하여 無視할 수 있을 것.
- ② 船體磁氣는 比較的 安定된 것일 것.
- ③ 船體는 地理的인 緯도가 크게 변하지 않는 區域을 航行할 것.

II. 地磁氣異常 測定에 關한 理論^{4) 5)}

기존의 船體磁氣에 關한 理論은 Poisson 方程式을 들 수 있으나 이것은 콤파스가 설치되어 있는 位置에 미치는 微視的인 船體磁氣를 다룬 것이다.

$$T_{\alpha}(x, z) = A \sum^{\alpha} \frac{\omega}{\gamma_{\alpha}^3} [(\alpha_1 - x) \cos i + (\gamma_1 - z) \sin i]$$

$$= A \sum^{\alpha} (x, z) \dots \dots \dots (2)$$

$$T_{\beta}(x, z) = B \sum^{\beta} \frac{\omega}{\gamma_{\beta}^3} [(\alpha_2 - x) \cos i + (\gamma_2 - z) \sin i]$$

$$= B \sum^{\beta} (x, z) \dots \dots \dots (3)$$

$$T_{\gamma}(x, z) = G \sum^{\gamma} \frac{\omega}{\gamma_{\gamma}^3} [(\alpha_3 - x) \cos i + (\gamma_3 - z) \sin i]$$

$$= G \sum^{\gamma} (x, z) \dots \dots \dots (4)$$

단, A, B, G는 各 各 船體磁化의 磁北方向成分, 磁東方向成分 및 垂直方向成分을 나타내고 ω는 直六面體 表面의 外向法線이 座標軸과 同方向이면

$$T(x, z) = A \sum^{\alpha} (x, z) + B \sum^{\beta} (x, z) + G \sum^{\gamma} (x, z) \dots \dots \dots (5)$$

로 쓸 수 있다.

만일 觀測點(y=0)이 n개이면 式(5)와 같은 方程式이 n개 얻어진다. 즉,

$$\left. \begin{aligned} T(x_1, z_1) &= A \sum^{\alpha} (x_1, z_1) + B \sum^{\beta} (x_1, z_1) + G \sum^{\gamma} (x_1, z_1) \\ T(x_2, z_2) &= A \sum^{\alpha} (x_2, z_2) + B \sum^{\beta} (x_2, z_2) + G \sum^{\gamma} (x_2, z_2) \\ &\vdots \\ T(x_n, z_n) &= A \sum^{\alpha} (x_n, z_n) + B \sum^{\beta} (x_n, z_n) + G \sum^{\gamma} (x_n, z_n) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

이 論文에서는 總體的인 船體磁氣의 모델을 決定하고 그 船體磁氣의 세기가 最小인 位置를 探索하기 위하여 地球磁場內에 존재하는 船體磁氣는 地磁氣異常의 現象이 있는 地域의 경우와 같은 것으로 간주하고 地磁氣異常에 對한 磁化度 推定에 활용되고 있는 Vacquier's method를 導入하였다. 그 理論的인 배경은 다음과 같다.

먼저 한점의 全磁氣強度異常을 ΔT, 全地磁氣의 水平分力異常을 ΔH, 垂直分力異常을 ΔZ, 그곳의 地磁氣의 伏角을 i라 하면 ΔT는

$$\Delta T = \Delta H \cos i + \Delta Z \sin i \dots \dots \dots (1)$$

로 表示된다. 여기서 H는 磁北方向이면 (+), Z는 下方向이면 (+)이다. 船體를 많은 直六面體로 나누고 이들에 의한 磁場의 세기의 合을 計算한다. 船體의 磁化方向이 일정하고 磁化의 強度가 均等하다고 假定하면 船體의 磁化度는 船體表面에 있는 磁極으로 代替할 수 있다.

이때 Fig. 1처럼 直角座標系를 定하면 觀測點 P(x,0,z)에서의 全磁氣 強度異常은 이들 表面이 x, y, z軸에 平行하므로 各各 다음式으로 表示된다.

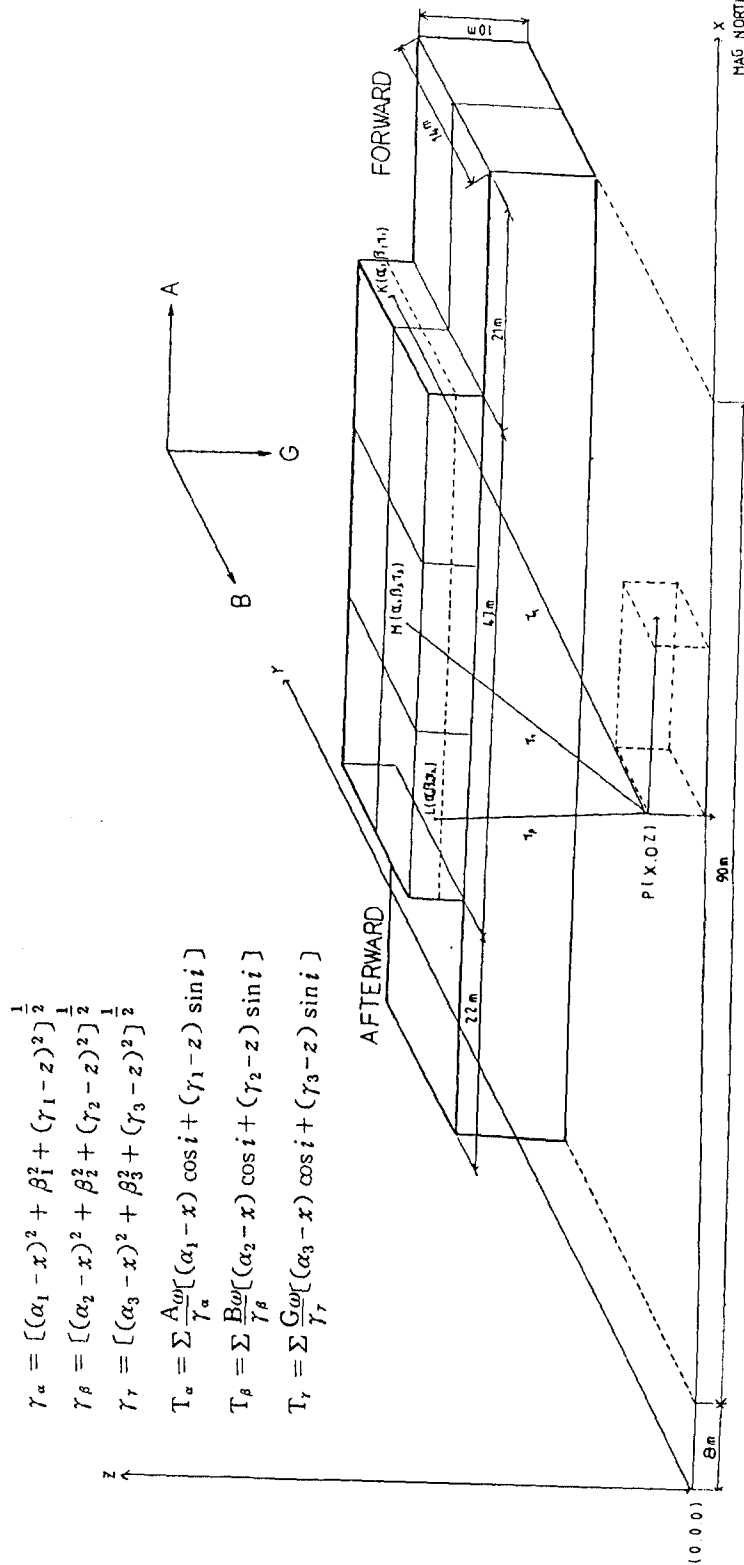


Fig. 1 Diagram of the scheme of computation

가 된다.

방정식 (6)에서 $T(x, z)$ 는 觀測異常(observed anomaly)이고 $\sum(x, z)$, $\sum(x, z)$ 및 $\sum(x, z)$ 는 船體의 形態에 관한 데이터로 計算된다. 船體磁化

$$\begin{bmatrix} \sum(T \cdot \alpha) \\ \sum(T \cdot \beta) \\ \sum(T \cdot \gamma) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum(\alpha)^2 & \sum(\alpha \cdot \beta) & \sum(\alpha \cdot \gamma) \\ \sum(\alpha \cdot \beta) & \sum(\beta)^2 & \sum(\beta \cdot \gamma) \\ \sum(\alpha \cdot \gamma) & \sum(\beta \cdot \gamma) & \sum(\gamma)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ G \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

船體磁化의 成分系數 A, B, G를 이용하여 船體磁氣의 船首尾方向에 對한 偏差 Dm, 傾斜角 im을 구할 수 있다. 즉,

$$Dm = \tan^{-1}(B/A) \dots\dots\dots (8)$$

$$im = \tan^{-1}[G/(A^2+B^2)^{1/2}] \dots\dots\dots (9)$$

이고, 磁化세기 I는

$$I = (A^2 + B^2 + G^2)^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

이다.

그런데 船體磁化 磁北成分 A, 磁東成分 B는 船體磁氣測定時 船體의 磁針路로 수정되어 하는데 船首尾方向의 磁化系數를 A', 正橫方向의 磁化系數를 B', 磁針路를 ρ라 하면

$$A' = A \cos \rho \dots\dots\dots (11)$$

$$B' = B \cos \rho \dots\dots\dots (12)$$

로 표시된다.

의 成分系數 A, B, G는 最小自乘法(the method of least squares)으로 求할 수 있다. 실제 計算에서는 \sum 를 먼저 계산한 후 最小自乘法의 正規方程式 (7)을 逆行列로 풀어 A, B, G를 計算한다.

III. 船體磁氣의 實測

Vacquier's method로 總體의인 船體磁氣를 결정할 目的으로 船舶이 接岸된 경우와 離岸된 경우 各 各 부두에서 船體磁氣를 實測하였다. 또 이 method의 妥當性 여부를 確認할 目的으로 船上에서 船體磁氣를 實測하였다.

測定裝備: Magnetometer(RFL, Industries Inc. USA)

Range 5~100kgammas

測定對象船舶: 韓國海洋大學 實習船 한바다' 호,
길이 90m, 폭 14.5m, 깊이 7m,
톤수 3,492톤, 測定當時의 換수 4.0m <Fig.2>



Fig. 2 Magnetometer and experimental vessel

'한바다'號가 船首方向 036°로 接岸된 경우 上 記 船 舶 에서 20m 떨 어진 船 首 尾 方 向 과 平 行 한 線 을 따 라 서 5m 의 간 격 으 로 높 이 1.5m 인 點 과 높 이 3.0m 인 位 치 에서 magnetometer의 sensor를 Fig.2 와 같 이 고 정 하 고 각 位 置 에서 sensor를 磁 北 方 向, 磁 東 方 向, 垂 直 方 向 으 로 向 하 게 하 여 船 體 磁 氣 를

測定한 다음 上 記 船 舶 이 離 岸 한 後 接 岸 中 의 그 것 과 동 일 한 位 置 에서 동 일 한 方 法 으 로 船 體 磁 氣 를 測定하였다. 그 다음 接 岸 中 에 測定한 값 과 離 岸 中 에 測定한 값 과 의 差 를 觀 測 異 常 으 로 하 였 다. 그 測定 位 置 와 測定 值 는 Fig.3 및 Table.1이다.

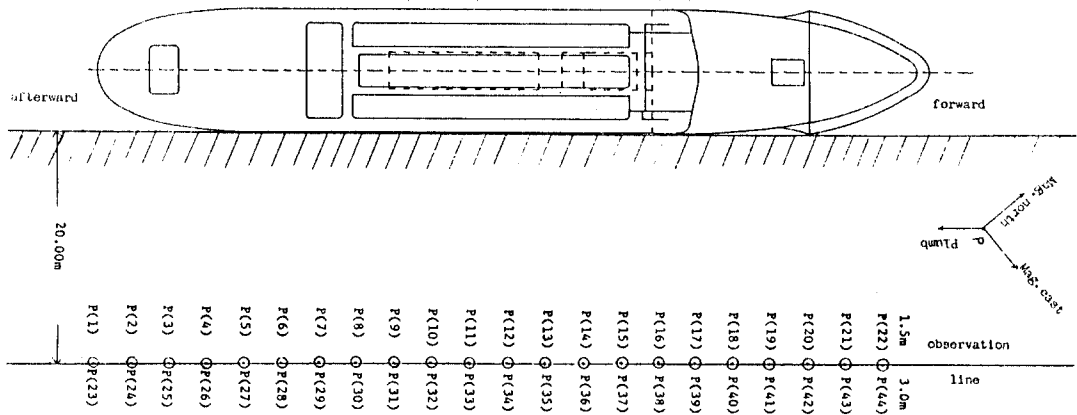


Fig. 3 Observation positions on the dock

TABLE 1

NO	SHIP ALONGSIDE			SHIP AWAY			OBSERVED ANOMALY			INTENSITY
	NORTH	EAST	PLUMB	NORTH	EAST	PLUMB	NORTH	EAST	PLUMB	
1	.10	.02	.12	.17	.00	.20	.07	-.02	.08	.1082
2	.12	.03	.12	.16	.05	.20	.04	.02	.08	.0917
3	.12	.04	.14	.18	.04	.21	.06	.00	.07	.0922
4	.12	.01	.14	.17	.05	.21	.05	.04	.07	.0949
5	.12	.04	.14	.17	.03	.22	.05	-.01	.08	.0949
6	.13	.02	.12	.18	.06	.21	.05	.04	.09	.1105
7	.13	.01	.13	.18	.08	.20	.05	.07	.07	.1109
8	.12	.01	.13	.18	.03	.21	.06	.02	.08	.1020
9	.12	.04	.15	.17	.04	.21	.05	.00	.06	.0781
10	.13	.01	.12	.17	.04	.21	.04	.03	.09	.1030
11	.01	.04	.12	.17	.03	.21	.16	-.01	.09	.1838
12	.13	.02	.01	.17	.05	.20	.04	.03	.19	.1965
13	.13	.02	.12	.17	.04	.22	.04	.02	.10	.1095
14	.09	.03	.10	.17	.05	.21	.08	.02	.11	.1375
15	.12	.02	.12	.18	.05	.21	.06	.03	.09	.1122
16	.10	-.01	.12	.18	.06	.22	.08	.07	.10	.1459
17	.14	.01	.14	.18	.05	.21	.04	.04	.07	.0900
18	.13	.00	.14	.18	.05	.21	.05	.05	.07	.0995
19	.25	.00	.13	.17	.03	.22	-.08	.03	.09	.1241
20	.13	.01	.15	.17	.05	.21	.04	.04	.06	.0825
21	.14	.01	.13	.18	.04	.22	.04	.03	.09	.1030
22	.14	.02	.14	.17	.05	.21	.03	.03	.07	.0819
23	.15	.07	.15	.18	.00	.21	.03	-.07	.06	.0970
24	.20	.06	.14	.18	.01	.19	-.02	-.05	.05	.0735
25	.10	.06	.14	.18	.01	.20	.08	-.05	.06	.1118
26	.15	.07	.20	.18	.02	.21	.03	-.05	.01	.0592
27	.13	.02	.14	.17	.00	.21	.04	-.02	.07	.0831
28	.13	.01	.19	.20	.03	.19	.07	.02	.00	.0728
29	.14	.08	.14	.20	.05	.19	.06	-.03	.05	.0837
30	.13	.09	.14	.18	.00	.19	.05	-.09	.05	.1145
31	.15	.05	.14	.18	.02	.20	.03	-.03	.06	.0735
32	.13	.04	.13	.18	.02	.20	.05	-.02	.07	.0883
33	.09	.07	.13	.17	.01	.19	.08	-.06	.06	.1166
34	.09	.03	.13	.18	.01	.18	.09	-.02	.05	.1049
35	.13	.04	.13	.18	.02	.21	.05	-.02	.08	.0964
36	.07	.05	.12	.17	.01	.19	.10	-.04	.07	.1285
37	.13	.04	.13	.18	.03	.19	.05	-.01	.06	.0787
38	.14	.04	.13	.18	.03	.19	.04	-.01	.06	.0728
39	.10	.06	.10	.18	.02	.19	.08	-.04	.09	.1269
40	.10	.04	.15	.17	.03	.18	.07	-.01	.03	.0768
41	.13	.03	.12	.17	.01	.18	.04	-.02	.06	.0748
42	.15	.05	.14	.18	.02	.18	.03	-.03	.04	.0583
43	.15	.03	.15	.18	.01	.20	.03	-.02	.05	.0616
44	.07	.04	.15	.17	.03	.19	.10	-.01	.04	.1082

이번에는 上記船舶이 船首方位가 똑같이 036°로 接岸되어 있을 때 上甲板面에서 1.5m 上方의 各 測定位置에서 magnetometer의 sensor를 船首尾, 正橫 및 垂直方向으로 向하게 하여 船體磁氣를 測

정한 다음 그 부근의 地磁氣의 水平分力 0.30 Oe 및 垂直分力 0.36 Oe를 빼어서 나온 값을 船體磁氣에 의한 測定値로 하였다. 그 測定位置와 測定値는 Fig.4와 같다.

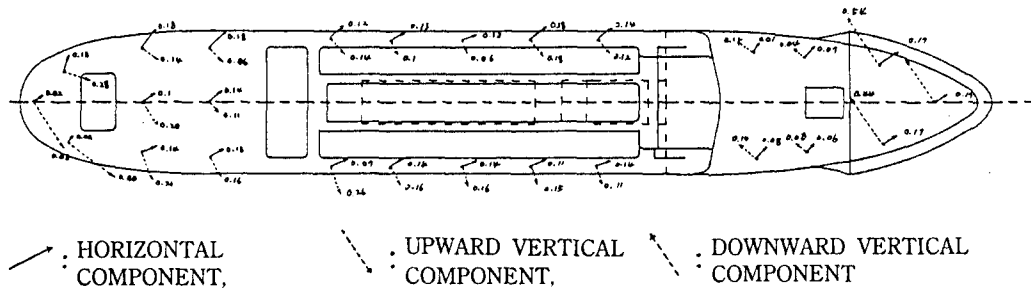


Fig. 4 Observed magnetic force components on deck

IV. 總體的 船體磁氣

Vacquier's method로 總體的 船體磁氣를 計算하기 위하여 船體를 船首尾方向, 正橫方向 및 높이 方向으로 각각 1m 간격으로 나누어 그것을 直角座標上의 位置로 하였다. 船舶의 길이는 90m, 폭은 14m, keel에서 shelter deck까지는 10m, shelter deck에서 promenade deck까지는 5m로 모델링하여 계산하였다 (Fig.1 및 附錄).

計算結果에 의하면 磁北方向의 磁化成分 A는 -

0.6093, 磁東方向의 磁化成分 B는 0.4999, 垂直方向의 磁化成分 G는 -0.6099이다. 그런데 船舶이 磁針路 036°로 接岸하고 있으므로 船首尾方向의 磁化成分 A' 및 正橫方向의 磁化成分 B'는 上記의 A, B의 값에 磁針路에 對한 餘弦(cosine)을 취하면 되므로 A'는 -0.4929, B'는 0.4044가 된다. 이것으로부터 船首尾方向에 對한 偏角은 약 39.4°, 傾斜角은 약 43.7°가 된다. 이것으로 미루어 볼 때 總體的인 船體磁氣는 傾斜角이 약 43.7°, 偏角이 약 39.4°인 하나의 막대자석으로 代表될 수 있다 (Fig. 5).

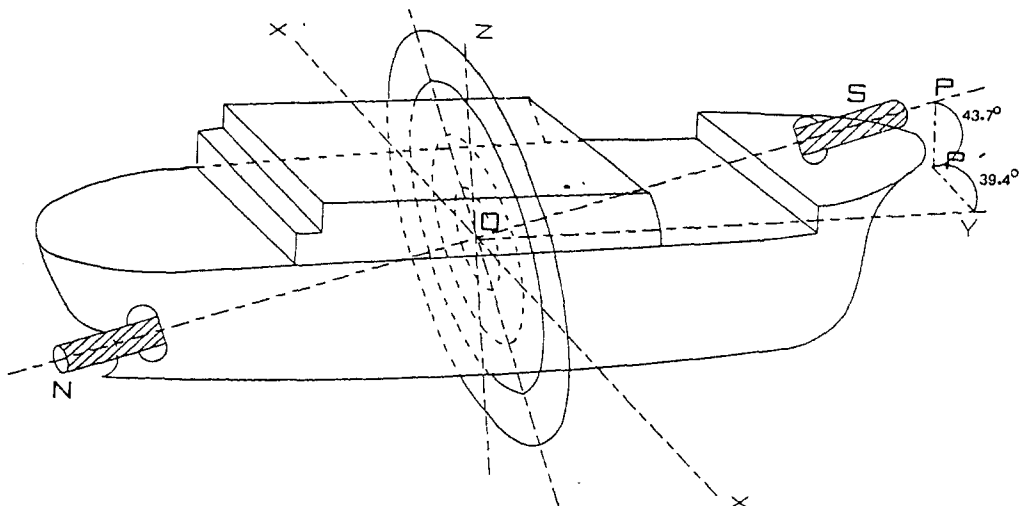


Fig. 5 Permanent bar magnet representing ship's magnetism and circle of magnetic equi-potential

그런데 甲板上에서 測定한 Fig.4의 船體磁氣에서
 ① 全磁力的 세기(strength of total force), ② 全磁
 力的 傾斜角(dip of total force), ③ 船首尾方向에

對한 水平分力の 偏角(horizontal component's
 deflection from fore and aft line)등을 船體의 길
 이에 對하여 정리하면 Fig.6과 같다.

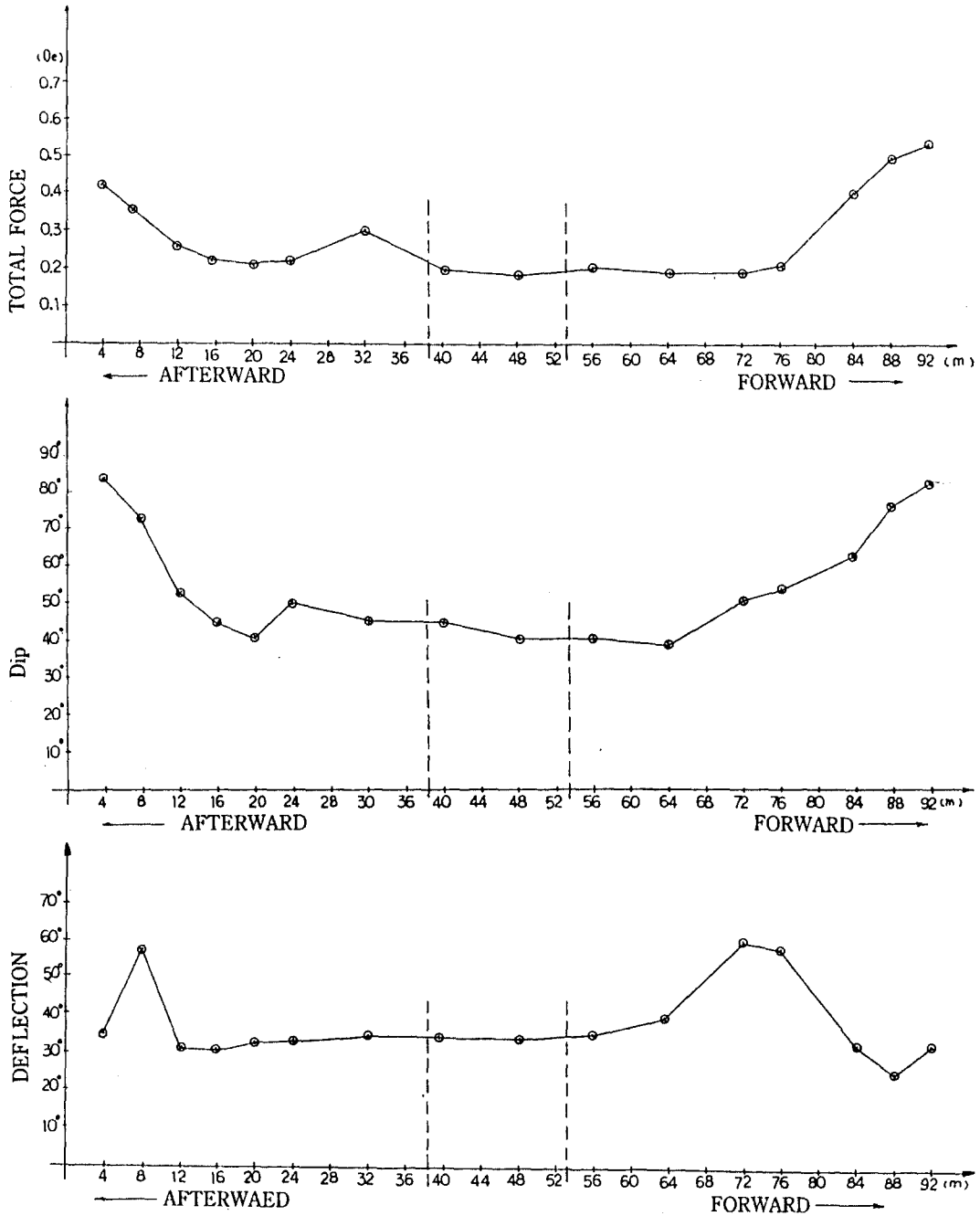


Fig. 6 Strength, dip and deflection of observed ship's magnetic field versus ship's length

Fig.6은 ①全磁場의 세기는 船首 또는 船尾 부근으로 갈수록 강하고 중앙부근에서 약하며 중앙부근의 磁氣의 세기는 약 0.2 Oe이다. ②全磁力의 傾斜角은 船首 또는 船尾 부근으로 갈수록 크며 중앙부근이 작아 全磁場의 세기를 나타내는 特性曲線과 거의 일치하고 있으며 그 角度는 중앙부근에서는 약 43°이다. ③船首尾방향에 대한 水平力의 偏角은 중앙부근에서 약 36°로 일정하다.

이상의 結果를 종합하면 總體의인 傾斜角 43°, 偏角 36°인 막대자석으로 代表될 수 있는 바 이는 Vacquier's method에 의한 計算의 結果와 거의 일치하고 있다.

$$U = \frac{M}{2l} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \dots\dots\dots (13)$$

단, $r_1^2 = [r^2 + l^2] - [\sin \theta (2ar \cos \phi + 2br \sin \phi) + 2cr \cos \theta]$
 $r_2^2 = [r^2 + l^2] + [\sin \theta (2ar \cos \phi + 2br \sin \phi) + 2cr \cos \theta]$
 $l^2 = a^2 + b^2 + c^2$ ($a = l \sin \theta \cos \theta$, $b = l \sin \theta \sin \theta$, $c = l \cos \theta$)
 $x = r \sin \theta \cos \phi$, $y = r \sin \theta \sin \phi$, $z = r \cos \theta$

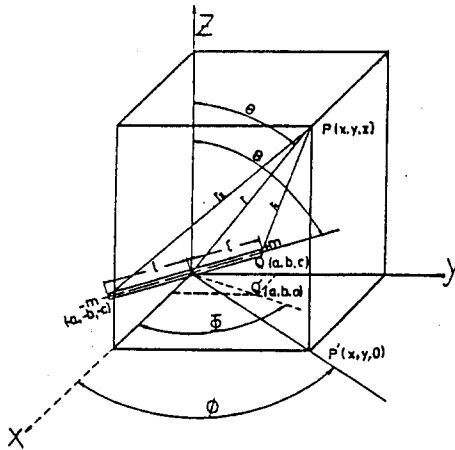


Fig. 7 Magnetic potential due to a bar magnet in spherical coordinate system

한편 磁場의 세기 \vec{H} 는 $\vec{H} = -\nabla U$ 이므로 \vec{H} 의 r , θ , ϕ 의 方向成分을 각각 \vec{H}_r , \vec{H}_θ , \vec{H}_ϕ 라 하면 이들은

$$\vec{H}_r = -\frac{\partial U}{\partial r} = (M/2l) \{ r - \sin \theta (a \cos \phi + b \sin \phi) - c \cos \theta \} \cdot r_1^{-3} - \{ r + \sin \theta (a \cos \phi + b \sin \phi) + c \cos \theta \} \cdot r_2^{-3} \} \vec{e}_r \dots\dots\dots (14)$$

$$\vec{H}_\theta = -\frac{\partial U}{\partial \theta} = (M/2l) [\cos \theta (a \cos \phi + b \sin \phi) + c \sin \theta] [r_1^{-3} + r_2^{-3}] \vec{e}_\theta \dots\dots\dots (15)$$

$$\vec{H}_\phi = -\frac{\partial U}{\partial \phi} = (M/2l) (a \sin \phi - b \cos \phi) (r_1^{-3} + r_2^{-3}) \vec{e}_\phi \dots\dots\dots (16)$$

*註) Fig.7은 直角座標로 나타냈으나 計算便宜上 球座標로 바꿔 사용하였음.

또 磁場의 세기 \vec{H} 의 크기 H 는 다음식으로 表示 된다.

$$\begin{aligned}
 |H| &= (|\vec{H}_1|^2 + |\vec{H}_2|^2 + |\vec{H}_3|^2)^{\frac{1}{2}} \\
 &= (M/2l)(r_1^{-4} + r_2^{-4} + 2(l^2 - r^2)r_1^{-3} \cdot r_2^{-3})^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (17)
 \end{aligned}$$

(17)式을 基礎로 計算機 시뮬레이션하여 H 가 最小인 값으로써 等磁位圈을 구하면 Fig.5와 같이 磁石 NS의 垂直二等分面上의 點들이 되며 中心으로부터 먼 것일수록 약한 磁場의 세기를 갖게 된다. 船體内部를 통과하는 等磁位圈(點線部分)은 局部 磁場의 영향을 받기 쉽다. 따라서 遠隔指示式 磁氣콤파스의 感知部는 船體外部로 노출된 等磁位圈 즉, 實線部門을 따라서 設置되어야 할 것이다. 이러한 物理的인 要素와 設置上에 부딪치는 空間的인 制約 등을 고려하면 上記 感知部는 船體의 中央附近의 左舷 上方에 설치되어야 한다.

VI. 結 論

船體磁氣의 세기가 약한 곳에 遠隔指示式 磁氣 콤파스의 感知部를 설치하면 自差를 빈번히 修正 하지 않더라도 그 效用性이 좋을 것이라는 點에 着案하여 船體磁氣의 最小磁場 位置를 決定하기로 하고 局地的 地磁氣異常의 決定에 活用되는 Vacquier's method와 막대자석에 關한 理論을 導入하였던 바 다음과 같은 點이 밝혀졌다.

① 總體的인 船體磁場은 局地的 地磁氣異常 測定에 活用되는 Vacquier's method로 表現할 수 있으며 船體磁氣는 하나의 永久磁石으로 모델화할 수 있다.

② 모델화된 永久磁石의 中心은 船體의 中心과 거의 일치하고 그 磁石의 船首尾方向에 對한 偏角은 약 39.4°이고 그 傾斜角은 약 43.7°이다.

③ 모델화된 막대자석의 垂直二等分面内에서는 中心에서의 거리가 멀수록 船體磁氣의 영향이 작다. 그러나 船内の 局部磁場의 방해력을 고려하면 甲板上으로 노출된 垂直二等分面을 位置選定領域

으로 하여야 하므로 모델 선박에서는 중앙부의 左舷 上部가 遠隔指示式 磁氣콤파스의 感知部의 設置 位置로 적합하다.

이 論文에서는 總體的으로 본 船體磁氣를 하나의 永久磁石으로 모델화하여 磁氣콤파스의 感知部의 位置를 선정하는 기초적인 방안을 제안하였다. 그러나 設置位置와 自差의 크기와의 關係는 다양한 實船實驗을 통하여 규명되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

- 1) 이상집 : 기본항해기기, pp.132-134, 아성출판사, 1982.
- 2) 이상집 : 遠隔指示式 磁氣 compass에 關한 研究(I), 韓國航海學會誌, 第10卷 第1號, 1986.
- 3) Victor Vacquier, Geomagnetism in Marine Geology, pp.85-88, Elsevier Publishing Company, 1972.
- 4) Seiya Uyeda and Michael Richards, Magnetization of Four Pacific Seamounts near the Japan Islands, pp.180-183, Bulletin of The Earthquake Research Institute, Vol.44, 1966.
- 5) 金基成 : 測地·地球物理總論, pp.279-283, 技工社, 1980.
- 6) Alfred Hine, B. Sc., Magnetic Compasses and magnetometers, pp.269-270, University of Toronto Press, 1968.
- 7) 竹山說三 : 電磁氣學現像理論, pp.297-301, 丸善株式會社, 1957.
- 8) 太田惠造 : 磁氣工學의 基礎(I), pp.15-18, 共立全書, 1973.

부 록

```

*      program for composition of hull magnetism in case of
*      m/v Harbada's heading 030 deg
*
*
1      dimension d(264),dd(132),t(50),tt(50),pn1(30),pn2(30),pe1(30),
2          pe2(30),pz(30),north(50),east(50),plumb(50),ppn1(30),
3          ppn2(30),ppe1(30),ppe2(30),ppz(30),x(3,4),q(3,4),
          cc(50),res(50)
*      real north,inc
*
          open(5,file='taen.d',status='old')
          read(5,*) (d(k),k=1,264)
          close(5)
          open(66,file='taen.r',status='new')
          write(66,*)
          do 50 k=1,132
              dd(k)=d(132+k)-d(k)
50      continue
          do 100 n=1,44
              t(n)=dd(3*n-2)**2+dd(3*n-1)**2+dd(3*n)**2
              tt(n)=sqrt(t(n))
100     continue
          write(66,650)
650     format(///31x,'TABLE I')
          write(66,600)
600     format(/7x,'SHIP ALONGSIDE',9x,'SHIP AWAY',8x,'OBSERVED ANOMALY'
1          //3x,'NO',1x,'NORTH',2x,'EAST',1x,'PLUMB',3x,'NORTH',
2          2x,'EAST',1x,'PLUMB',3x,'NORTH',2x,'EAST',1x,'PLUMB',
3          2x,'INTENSITY')
          do 610 k=1,44
              kk=k+44
              write(66,620) k,d(3*k-2),d(3*k-1),d(3*k),d(3*kk-2),d(3*kk-1),
1              d(3*kk),dd(3*k-2),dd(3*k-1),dd(3*k),tt(k)
620     format(3x,i2,3(1x,f5.2),2x,3(1x,f5.2),2x,3(1x,f5.2),4x,
2              f7.4)
610     continue
          z=8.2
          call abnormal(z,pn1,pn2,pe1,pe2,pz)
          write(66,*)
          write(66,250)
250     format(7x,'MAGNETISM CAUSED BY HULL MAGNETISM')
          write(66,30)
30      format(4x,'NO',3x,' NORTH',3x,' EAST',3x,' PLUMB')
          do 200 k=1,22
              north(k)=pn1(k)+pn2(k)
              east(k)=pe1(k)+pe2(k)
              plumb(k)=pz(k)
              write(66,35) k,north(k),east(k),plumb(k)
35      format(4x,i2,3(3x,f8.4))
200     continue
          z1=9.7
          call abnormal(z1,ppn1,ppn2,ppe1,ppe2,ppz)
          do 300 k=1,22
              kk=k+22
              north(kk)=ppn1(k)+ppn2(k)
              east(kk)=ppe1(k)+ppe2(k)
              plumb(kk)=ppz(k)
              write(66,35) kk,north(kk),east(kk),plumb(kk)
300     continue
          call lesq(tt,north,east,plumb,x,q)
          write(66,*)
          write(66,70) ((x(i,j),j=1,4),i=1,3)

```

```

70      format(4x,'SIMULTAEQUS EQUATTONS'/sp,1x,f7.3,'A',f7.3,'B',
1         f7.3,'G =',f7.3)
      a=q(1,4)
      b=q(2,4)
      g=q(3,4)
      write(66,*)
      write(66,400) a,b,g
400     format(3x,'A =',f8.4,3x,'B =',f8.4,3x,'G =',f8.4)
      dm=b/a
      x1=a*a+b*b
      x11=sqrt(x1)
      xi=g/x11
      s=x1+g*g
      dec=57.2958*atan(dm)
      inc=57.2958*atan(xi)
      segi=sqrt(s)
      write(66,*)
      write(66,500) dec,inc,segi
500     format(3x,'DEVIATION =',f6.1,/3x,'INCLINATION =',f6.1/3x,
1         'INTENSITY =',f7.4)
      write(66,1500)
1500    format(///23x,'TABLE II')
      write(66,1000)
1000    format(/3x,' NO',2x,'OBSERVED ANOMALY',2x,'COMPUTED ANOMALY',
1         6x,'RESIDUAL')
      do 1800 k=1,44
          cc(k)=north(k)*a+east(k)*b+plumb(k)*g
          res(k)=tt(k)-cc(k)
          write(66,1100) k,tt(k),cc(k),res(k)
1100    format(3x,i3,4x,f12.4,6x,f12.4,4x,f12.4)
1800    continue
      sumt=0.0
      sumr=0.0
      do 2000 k=1,44
          sumt=sumt+abs(tt(k))
          sumr=sumr+abs(res(k))
2000    continue
      good=sumt/sumr
      write(66,*)
      write(66,2500) sumt,sumr,good
2500    format(//3x,'SUM OF OBSERVED ANOMALY=',f5.3/3x,'SUM OF RESIDUAL='
1         ,f5.3/3x,'GOODNESS OF RATIO R=',f5.3)
      close(66)
      stop
      end

*
*
*
      subroutine abnormal(z,pn1,pn2,pe1,pe2,pz)
      dimension pn1(30),pn2(30),pe1(30),pe2(30),pz(30),pee1(30),
1         pee2(30),pee3(30),pee4(30),pnn1(30),pnn2(30),pnn3(30),
2         pnn4(30),pzz1(30),pzz2(30),x1(90),x2(30)
      equivalence (pee1(1),pee3(1)),(pee2(1),pee4(1)),(pnn1(1),pnn3(1)),
1         (pnn2(1),pnn4(1))
*
      x=45.0/180.0*3.141592
      co=cos(x)
      si=sin(x)
      do 500 k=1,90
          x1(k)=float(k)
500     continue
      do 600 k=1,30
          x2(k)=5.0*float(k)-5.0

```

```

600  continue
     do 1000 i=1,22
         pee1(i)=0.0
         pee2(i)=0.0
         kount=0
         do 1000 k=1,10
             do 1000 n=1,90
                 kount=kount+1
                 a=x1(n)+6.5-x2(i)
                 b=-20.0
                 c=x1(k)-0.5-z
                 call hapkye(a,b,c,co,si,sum)
                 pee1(i)=pee1(i)+sum
                 b1=-34.0
                 call hapkye(a,b1,c,co,si,sums)
                 pee2(i)=pee2(i)+sums
                 pe1(i)=pee1(i)-pee2(i)
                 write(*,*) 'kount=',kount,'pe1(',i,')=',pe1(i)
1000  continue
     do 2000 i=1,22
         pee3(i)=0.0
         pee4(i)=0.0
         kount=0
         do 2000 k=1,5
             do 2000 n=1,47
                 kount=kount+1
                 a=x1(n)+27.5-x2(i)
                 b=-20.0
                 c=x1(k)+9.5-z
                 call hapkye(a,b,c,co,si,sum)
                 pee3(i)=pee3(i)+sum
                 b1=-34.0
                 call hapkye(a,b1,c,co,si,sums)
                 pee4(i)=pee4(i)+sums
                 pe2(i)=pee3(i)-pee4(i)
                 write(*,*) 'kount=',kount,'pe2(',i,')=',pe2(i)
2000  continue
     do 3000 i=1,22
         pnn1(i)=0.0
         pnn2(i)=0.0
         kount=0
         do 3000 k=1,10
             do 3000 n=1,14
                 kount=kount+1
                 a=97.0-x2(i)
                 b=-(x1(n)+19.5)
                 c=x1(k)-0.5-z
                 call hapkye(a,b,c,co,si,sum)
                 pnn1(i)=pnn1(i)+sum
                 a1=7.0-x2(i)
                 call hapkye(a1,b,c,co,si,sums)
                 pnn2(i)=pnn2(i)+sums
                 pn1(i)=pnn1(i)-pnn2(i)
                 write(*,*) 'kount=',kount,'pn1(',i,')=',pn1(i)
3000  continue
     do 4000 i=1,22
         pnn3(i)=0.0
         pnn4(i)=0.0
         kount=0
         do 4000 k=1,5
             do 4000 n=1,14
                 kount=kount+1
                 a=75.0-x2(i)
                 b=-(x1(n)+19.5)

```

```

c=x1(k)+9.5-z
call hapkye(a,b,c,co,si,sum)
pnn3(i)=pnn3(i)+sum
a1=28.0-x2(i)
call hapkye(a1,b,c,co,si,sums)
pnn4(i)=pnn4(i)+sums
pn2(i)=pnn3(i)-pnn4(i)
write(*,*) 'kount=',kount,'pn2(',i,')=',pn2(i)
4000 continue
do 5000 i=1,22
  pzz1(i)=0.0
  kount=0
  do 5000 k=1,14
    do 5000 n=1,90
      kount=kount+1
      a=x1(n)+6.5-x2(i)
      b=-(x1(k)+19.5)
      c=-z
      call hapkye(a,b,c,co,si,sum)
      pzz1(i)=pzz1(i)+sum
      write(*,*) 'kount=',kount,'pzz1(',i,')=',pzz1(i)
5000 continue
do 6000 i=1,22
  pzz2(i)=0.0
  kount=0
  do 6000 k=1,14
    do 6000 n=1,90
      kount=kount+1
      if(n .le. 21) then
        a=x1(n)+6.5-x2(i)
        b=-(x1(k)+19.5)
        c=10.0-z
        call hapkye(a,b,c,co,si,sum1)
        pzz2(i)=pzz2(i)+sum1
      else if(n .le. 60) then
        a=x1(n)+27.5-x2(i)
        b=-(x1(k)+19.5)
        c=15.0-z
        call hapkye(a,b,c,co,si,sum2)
        pzz2(i)=pzz2(i)+sum2
      else
        a=x1(n)+74.5-x2(i)
        b=-(x1(k)+19.5)
        c=10.0-z
        call hapkye(a,b,c,co,si,sum3)
        pzz2(i)=pzz2(i)+sum3
      endif
      write(*,*) 'kount=',kount,'pzz2(',i,')=',pzz2(i)
6000 continue
do 7000 i=1,22
  pz(i)=pzz1(i)-pzz2(i)
7000 continue
return
end
*
*
*
subroutine lesq(tt,north,east,plumb,x,q)
dimension tt(50),north(50),east(50),plumb(50),x(3,4),hap(10),
1 tot(10),q(3,4)
real north
do 1000 k=1,10
  hap(k)=0.0
  tot(k)=0.0

```

```

1000  continue
      do 2000 k=1,44
          hap(1)=hap(1)+north(k)*north(k)
          hap(2)=hap(2)+north(k)*east(k)
          hap(3)=hap(3)+north(k)*plumb(k)
          hap(4)=hap(4)+east(k)*east(k)
          hap(5)=hap(5)+east(k)*plumb(k)
          hap(6)=hap(6)+plumb(k)*plumb(k)
2000  continue
      do 3000 k=1,44
          tot(1)=tot(1)+tt(k)*north(k)
          tot(2)=tot(2)+tt(k)*east(k)
          tot(3)=tot(3)+tt(k)*plumb(k)
3000  continue
      x(1,1)=hap(1)
      x(1,2)=hap(2)
      x(1,3)=hap(3)
      x(1,4)=tot(1)
      x(2,1)=x(1,2)
      x(2,2)=hap(4)
      x(2,3)=hap(5)
      x(2,4)=tot(2)
      x(3,1)=x(1,3)
      x(3,2)=x(2,3)
      x(3,3)=hap(6)
      x(3,4)=tot(3)
*
      do 4000 i=1,3
          do 4000 j=1,4
              q(i,j)=x(i,j)
4000  continue
      call yunlip(q,3,4)
      return
      end
*
*
*
      subroutine yunlip(x,row,col)
      integer row,col,pivot
      dimension x(row,col)
      do 100 pivot=1,row
          if(x(pivot,pivot) .eq. 0.0) then
              do 110 m=pivot+1,row
                  if(x(m,pivot) .ne. 0.0) goto 120
110          continue
120          if(m .gt. row) then
                  write(*,1000)
1000         format(3x,' ERROR -- CANNOT FIND NON-ZERO')
                  stop
              endif
              do 130 k=pivot,col
                  temp=x(pivot,k)
                  x(pivot,k)=x(m,k)
                  x(m,k)=temp
130          continue
              endif
              subtract pivot line from kth line
              do 160 k=1,row
                  if(k .eq. pivot) then
*                  this is pivot line
                    xpivot=x(pivot,pivot)
                    do 140 m=pivot,col
                        x(pivot,m)=x(pivot,m)/xpivot

```

```
140             continue
                else
                    alpha=x(k,pivot)/x(pivot,pivot)
                    do 150 m=pivot,col
                        x(k,m)=x(k,m)-alpha*x(pivot,m)
150             continue
                endif
160             continue
100         continue
        return
    end
```

```
*
*
*
```

```
subroutine hapkye(a,b,c,co,si,sum)
vac=a*a+b*b+c*c
ha=1.0/sqrt(vac)
haa=ha*ha*ha
sum=haa*(a*co+c*si)
return
end
```