

# Z 試驗에 의한 旋回圈의 作圖法에 關한 研究

吳 正 喆\*

## A Study on the Method of Turning Circle Drawing by Z-test

*Jung-Chul O*

### 〈 目 次 〉

Abstract  
號說明記  
I. 序 論  
II. 理 論  
III. 實船試驗

IV. 試驗結果에 對한 考察  
V. 實旋回圈에 一致시키기 爲한 Z 試驗旋回  
圈의 修正에 對한 數值計算  
VI. 結 論  
參考文獻 및 附錄

### Abstract

A navigator on bridge needs to know every kinds of motion characteristics of his vessel at sea. Generally when a vessel is completely built, the shipyard makes turning circle diagrams from the results of turning circle tests made during the sea trials for the reference of the vessel's owner.

But referring only the data of a turning circle diagram, an officer on bridge can not figure out his vessel's maneuvering characteristics sufficiently, So nowadays the shipyard often adds Z test to turning circle test for more detail references.

In this paper the author made Z and turning circle tests at the rudder angles of 15 and 35 degrees separately and in each of the case made a turning circle diagram from the results of the turning circle test and the results numerically calculated from mathematical formula made on the base of the maneuvering indices got from the Z test and compared them each other for the purpose of finding the correlations between them.

Followings are concluded from the results.

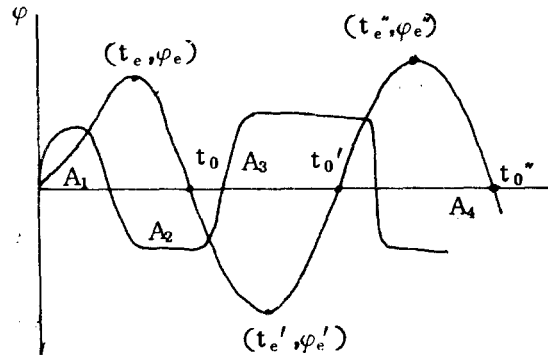
An actual turning circle diagram and a calculated one from the results of the Z test at same rudder angle coincides each other well when the center of the calculated circle is transferred by  $1.7B$  toward the direction of the initial turning perpendicularly to the original course and  $0.5L$  toward the direction in parallel with original course in case of the rudder angle of 35 degrees and  $1.2B$  and  $0.3L$  toward each of the above mentioned directions in case of rudder angle of 15 degrees.

\* 正會員, 木浦海洋專門大學

記 號 說 明

$M$ ; 船體質量  
 $u$ ;  $x$ 軸 方向速度  
 $v$ ;  $y$ 軸 方向速度  
 $I_z$ ;  $Z$ 軸에 對한 慣性能率  
 $iz$ ; 附加慣性 能率  
 $\phi$ ; 角變位置  
 $\dot{\phi}$ ; 角速度  
 $\ddot{\phi}$ ; 角加速度  
 $N$ ; 旋回 moment  
 $K$ ; 旋回性指數  
 $T$ ; 追從性 指數  
 $\delta$ ; 舵角  
 $t_1$ ; 一定 舵角을 잡는데 要하는 時間  
 $V$ ; 船速  
 $t$ ; 秒單位の 經過時間  
 $Hd$ ; 船首方位  
 $\delta r$ ; 舵角誤差  
 $C_o$ ; 針路  
 $\alpha_o$ ; 船首에서의 浮標測定角  
 $\beta_o$ ; 船尾에서의 " "  
 $\omega$ ; 角速度  
 $V_o$ ; 直進時의 速度  
 $V_A$ ; 旋回試驗時 平均速度  
 $R, R_Z$ ; 旋回半徑 및  $Z$ 試驗에 依한 旋回半徑

$\Delta x$ ; 實旋回 半徑과  $Z$ 試驗旋回 半徑의  $x$ 軸 方向의 差  
 $\Delta y$ ; 實旋回 半徑과  $Z$ 試驗旋回 半徑의  $y$ 軸 方向의 差  
 $X$ ; 船에 미치는 船首尾 方向의 힘  
 $Y$ ; 船에 미치는 橫方向의 힘  
 $Mx, My$ ; 附加質量



$A_1 \sim A_4$ ;  $\delta$  曲線과 time 軸이 만드는 各 樣形의 面積  
 $A_1 \sim A_4''$ ;  $t=0$  으로부터 始作하여  $t_e, t_e', t_e'', t_0, t_0', t_0''$ 의 各點까지  $\delta$  曲線과  $t$  軸이 만드는 面積  
 但,  $\delta$  曲線과  $t$  軸이 만드는 面積은 完全한 梯形으로 取쳐서 近似積分을 한다.

I. 序 論

操船者는 自己가 操縱하는 船舶의 運動特性을 알아야 하고 이것을 위하여 造船所에서는 船舶이 建造되면 旋回圈試驗을 行하고 旋回圈圖를 그려서 本船에 提供하여 왔으나, 이것만으로는 本船의 直進性 및 旋回特性을 確實하게 알 수 없으므로 最近에는 旋回圈試驗에 追加하여  $Z$ 試驗을 行하는 境遇가 자주 있게 되었다.

그러나 旋回圈試驗과  $Z$ 試驗間의 關係를 數值的으로 處理한 論文은 거의 찾아볼 수 없는 實情이다.

本 論文에서는  $Z$ 試驗과 旋回圈 試驗을 行하고,  $Z$ 試驗에서 얻은 操縱性 指數를 利用하여 旋回圈圖를 作成하였으며 이것을 旋回圈 試驗에서 얻은 旋回圈圖와 比較하여 그 關係를 다음의 두가지 點에 焦點을 두고 調査하였다.

첫째,  $Z$ 試驗에서 얻은 操縱性 指數를 利用하여 作圖한 旋回圈이 實際의 旋回圈과 그 크기에 있어

서 一致하는가에 對하여서이고,

둘째, 두 旋回圈 사이에 어떤 差異가 생기면 Z試驗 結果에서 計算한 旋回圈을 어떻게 修正하여 實際의 旋回圈圖와 一致시킬 수 있는가에 對하여서이다.

위의 檢討結果 Z試驗 結果에서 計算한 旋回圈 半徑의 크기는 實船의 그것과 거의 一致하였으며, 다만 Advance 와 Tactical diameter 에 差異가 생겼으므로 Z試驗에 의한 計算된 旋回圈을 實際의 旋回圈에 一致시키는 方法을 考案하고, 이것의 修正값을 船體의 길이와 幅의 倍數로 表示하였다.

## II. 理 論

### 1. 運動 方程式에 對한 考察

$$\left. \begin{aligned} (M+Mx)\dot{u} &= (M+My)\phi v + X^{1,2,10} \\ (M+My)\dot{v} &= -(M+Mx)\phi u + Y \\ (Iz+iz)\dot{\phi} &= N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

이와 같은 船體의 運動 方程式에서 前進力의 變動은 通常의 操船에서는 Fig.2에서 볼 수 있는 바와 같이  $u$ 의 變化는 正橫 方向의 힘 및 回頭 Moment 를 誘發하지 아니하므로 操船運動에 關與하는 程度는 二次의인 것으로 볼 수 있다.

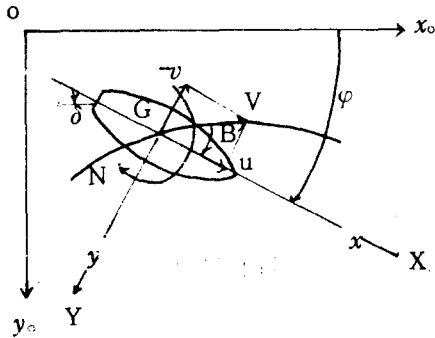


Fig. 1 Vector diagram of forces of a turning vessel

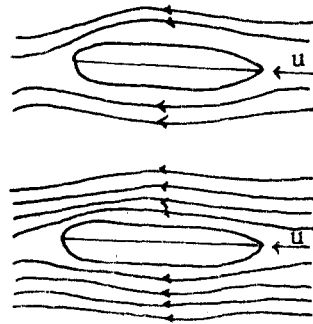


Fig. 2 Streamlines around a running vessel

따라서 둘째 및 세째式을 無次元化하여 船體運動에 關한 微分方程式을 만들면 다음과 같다.

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \phi}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\phi}{dt} + \phi = k \cdot \delta + K T_3 \frac{d\delta}{dt} \dots\dots\dots(2)$$

(2)式을 Laplace 變換하여 傳達函數를 求하면

$$\frac{\psi(S)}{\delta(S)} = \frac{K(1+T_2 S)}{(1+T_1 S)(1+T_2 S)} \dots\dots\dots(3)$$

但, 初期値는 모두 零

(3)式을  $|\omega|$ 가 작은 範圍에서 近似化하면

$$\frac{\psi(S)}{\delta(S)} = \frac{K}{1+T_2 S} \dots\dots\dots(4)$$

로 되고  $T = T_1 + T_2 - T_3$  가 된다. 따라서 運動方程式은

$$T \frac{d\dot{\phi}}{dt} + \dot{\phi} = K\delta^{1.5} \dots\dots\dots(5)$$

로 表示할 수 있다.

式(5)에서 보는 바와 같이  $K$ 와  $T$ 는 船體運動을 決定짓는 要素로 된다.  $K$ 는 一定舵角을 줄 때 旋回 角速度의 크기를 決定하는 要素로 旋回性指數라 부르고  $T$ 는 一定舵角을 준 후 船體가 곧 따라 回頭하는가 않는가를 決定하는 要素로 追從性指數라 부른다.

2. 操縱性指數를 利用한 旋回圈 作圖法

(5)式을 풀면

$$\phi(t) = K \cdot \delta (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \dots\dots\dots(6)$$

가 된다.

이것을 graph로 그리면 Fig.3과 같이 表示

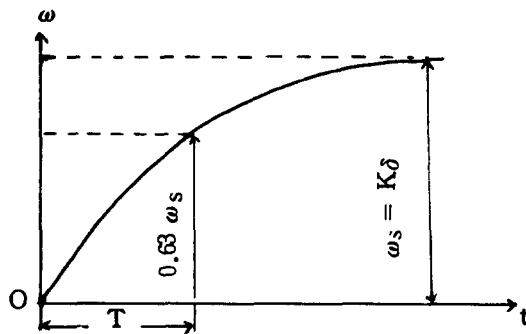


Fig. 3 Angular velocity of a turning vessel

된다. 따라서 이러한 內容을 Turning Circle 化하면 計算에 依한 旋回圈은 Fig.4와 같게 되지만 問題處理를 簡單하게 하기 위하여 船體는  $d_1 = V_0(T + \frac{1}{2}t_0)$  동안은 그대로 直進하고<sup>12)</sup> 그 以後부터 一定速度로 正常旋回를 한다고 假定하여 Fig.5와 같이 作圖한다.

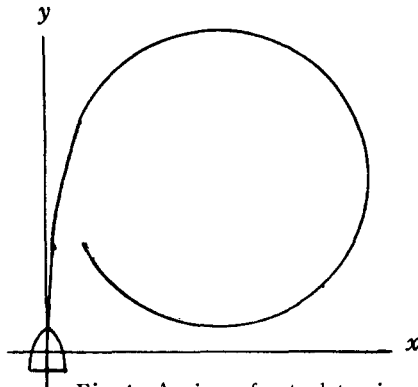


Fig. 4 A view of actual turning circle

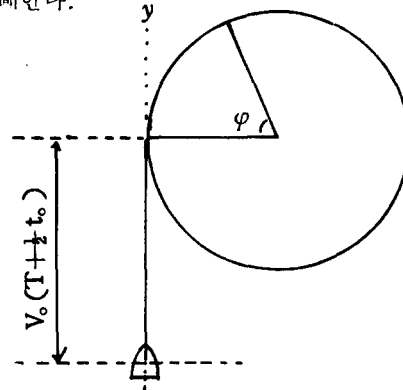


Fig. 5 Assumed turning circle from Z test calculation

3. Z試驗에서 얻은 計算 旋回圈을 實際의 旋回圈으로 修正하는 方法

實際로 旋回圈 試驗에 依하여 作圖한 여러가지 船舶들의 旋回圈을 調査한 結果 全舵 旋回時(35°) 船速減少는 回頭角 0°~90°사이에서 平均 40%, 半舵(15°) 旋回時에는 平均 15% 減少되고 있으며<sup>3)</sup> 그 以後에는 一定한 速力으로 正常旋回에 들어간다고<sup>4)</sup> 假定하여도 大差는 없다.

轉舵 直後에 船體의 G점은 原針路에서 轉舵 反對側으로 船體 길이의 1%程度<sup>5)</sup> 벗어나지만 이것은 微小한 量이므로 問題處理의 數值計算에 考慮치 않는다.

Z試驗 結果에서 計算한 旋回圈의 半徑과 實際의 旋回圈 半徑의 크기에 差異가 없다는 假定을 하면 計算 旋回圈을 實際의 旋回圈에 一致시키는 方法은 計算 旋回圈의 Advance와 Tactical diameter를 實際 旋回圈의 그것들에 一致하도록 修正하면 되고, 그 修正에 對한 數值計算式은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \int_0^{t_1} v_0 e^{at} \sin \omega t \cdot dt^{5), 6)} \\ y_1 &= \int_0^{t_1} v_0 e^{at} \cos \omega t \cdot dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= x_1 - Rz_1 = \left[ \frac{e^{at}}{a^2 + \omega^2} (a \sin \omega t - \omega \cos \omega t) \right]_0^{t_1} - \frac{v}{K\delta} \\ \Delta y &= y_1 - Rz_1 = \left[ \frac{e^{at}}{a^2 + \omega^2} (a \cos \omega t + \omega \sin \omega t) \right]_0^{t_1} - \frac{v}{K\delta} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

但, 全舵 旋回時;  $e^{at} = 1 \sim 0.6$

半舵 旋回時;  $e^{at} = 1 \sim 0.85$

$t$ ; Z試驗에서 旋回가 正常 角速度로 始作된다고 假定하는 時刻으로 부터 90° 旋回가 이루어지는데 까지의 所要된 時間

II. 實 船 試 驗

1. 浮標 方位盤法에 依한 旋回圈 測定法 및 旋回圈圖<sup>11), 13)</sup>

船首 및 船尾에 Dumb card를 設置하고 方位盤과의 距離를 82m로 하고 무게 童心 G는 中央에 있다고 假定하였다. “한바다號”에서 Drum筒으로 製作한 浮標를 海中에 投下하고 船首 및 船尾에 各各 2名의 教官을 配置하고 Bridge에는 船首方位 및 船速 記錄者를 配置하였다. Bridge에서는 旋回角 0°, 15°, 30°, 45°……, 每 15° 間隔으로 기적 信號를 울리고 이에 따라 船首 및 船尾에서는 浮標의 方位線을 긋고 Bridge에서는 船首方位 및 船速을 測定하였다.

hard part 旋回 1回, port(15°)旋回 1回, hard Sta'd 1回, Starboard(15°)旋回 1회를 試驗하고 終了하였다.

方位丸이 그렇진 Plotting sheet를 使用하여 中央을 0點으로 잡고  $C_0 + \alpha_0 + 180^\circ$  및  $C_0 + \beta_0 + 180^\circ$ 의 方位線을 긋고 各 測定時의 船首方向으로 그 測定數만큼의 화살표를 作圖한다.

方位盤間의 距離를 縮尺 1/4,000로 한 2cm에 該當하는 곳까지 위의 화살표를 平行 移動시켜 그 中央을 G點으로 잡고서 連結하면 旋回圈이 된다.

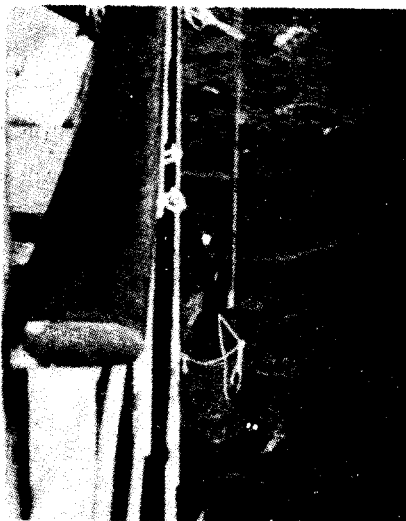
試驗에 使用된 “한바다”호의 諸元 및 Testing Condition 은 다음과 같다.

**Table 1.** Particulars of M/V Han Bada

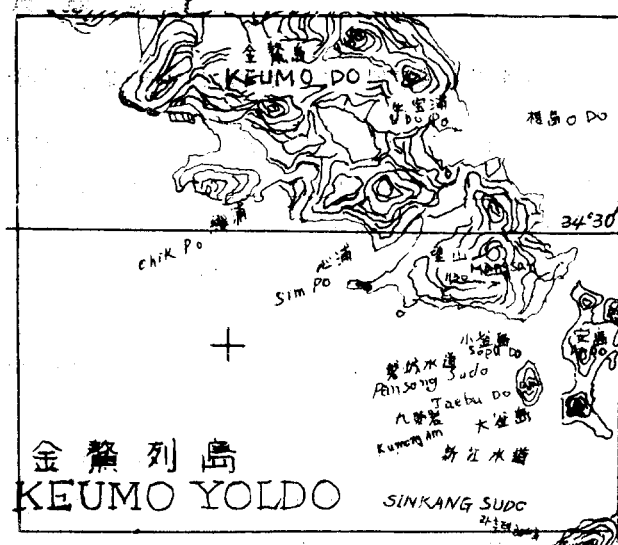
Kind of Ship	Training Ship
Length (L. O. A)	99.8m (L. B. P. =98m)
Breadth (Mld)	14.5m
Depth (to shelter deck)	9.5m
Full load draught	5.2m
Full load displacement	4230.35 t
Dead Weight	2169.15 t
Gross tonnage	3491.77 t
Net tonnage	1515.78 t
Main engine	Diesel 3800 H. P.(230 r. p. m)
Max. Speed (Sea trial)	16.55 kt.
Rudder type	Stream lined ballanced
Rudder area	9.31 m <sup>2</sup>
Area ratio	1/49.3

**Table 2.** Trial condition of M/V Han Bada

df 3.1	Wind force 3
da 5.3	Sea depth 15 fms
dm 4.2	Weather fine & cloudy
trim 2.2 by the stern	Wind direction 040°
position { Lat 33°-27' N	Sea state smooth
{ Long 127°-44' N	
Disp 3226.8 K/E	



**Fig. 6** The used buoy for turning circle test



**Fig. 7** Test conducted area

Table 3. Coordinate displacements at port 35 degree rudder due to buoy method turning test.

$\phi$	0°	5°	15°	30°	45°	60°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
$p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x$	0	0.3	0.6	1.1	1.8	2.6	4.3	6.7	7.6	6.4	3.6	1.1	0.4
$y$	0	3.2	3.9	4.3	4.8	5.6	6.1	4.8	3.1	-0.1	-1.1	0.3	2.1

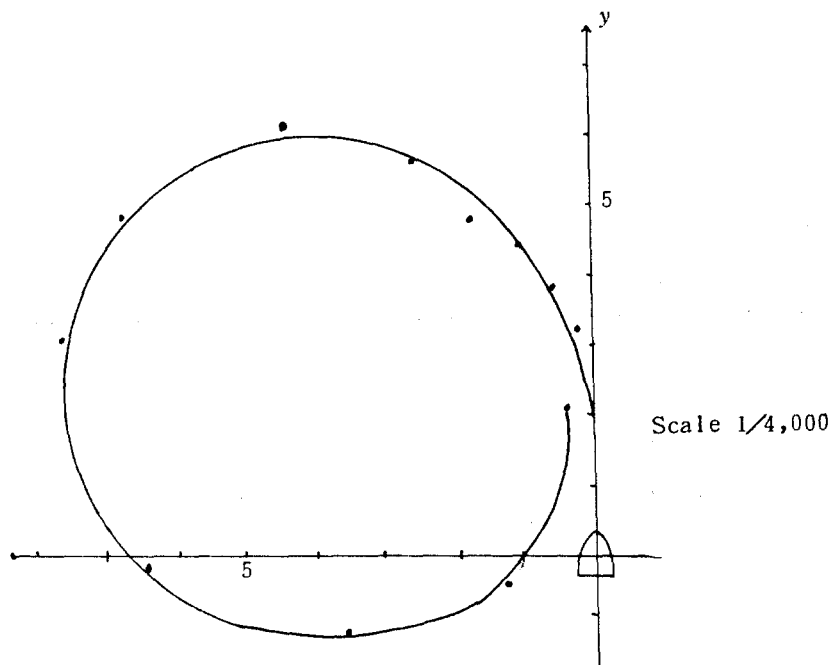


Fig. 8 Turning circle at port 35 degree rudder due to buoy method test

Table 4. Coordinate displacements at starboard 35 degree rudder due to buoy method turning test.

$\phi$	0°	5°	15°	30°	45°	60°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
$p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x$	0	0.2	0.3	0.9	1.2	2.3	4.7	8.1	9.2	8.5	5.9	2.7	1.5
$y$	0	2.8	3.8	4.4	5.4	6.2	7.1	5.8	2.2	0.5	-0.7	0.7	3.6

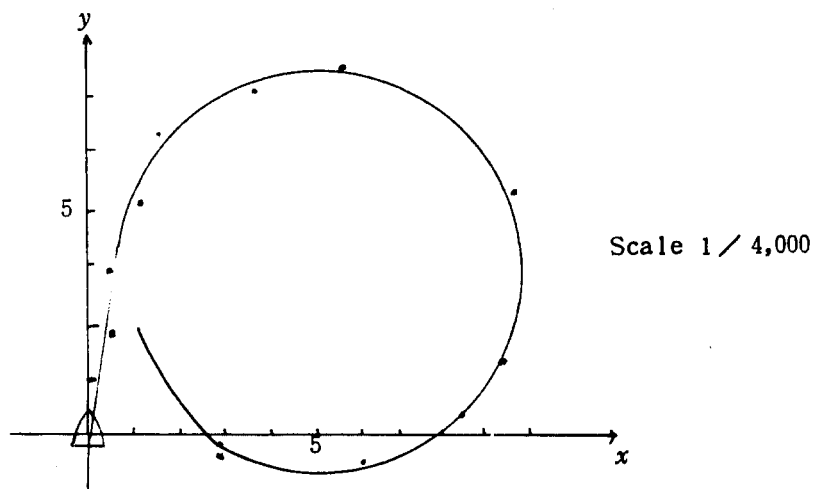


Fig. 9 Turning circle at starboard 35 degree rudder due to buoy method test

Table 5. Coordinate displacements at port 15 degree rudder due to buoy method turning test.

$\phi$	0°	5°	15°	30°	45°	60°	90°	135°	180°	252°	270°	315°	360°
$p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x$	0	0	0.2	0.4	1.6	2.7	6.6	11.8	13.7	10.3	5.7	2.7	1.8
$y$	0	1.3	2.5	4.5	6.1	7.3	8.3	6.3	1.4	-2.8	-3.4	-1.4	1.1

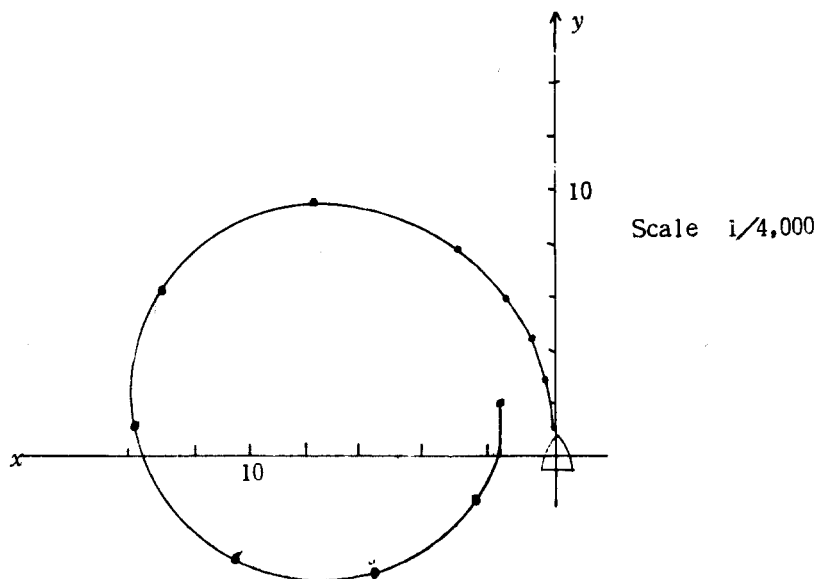
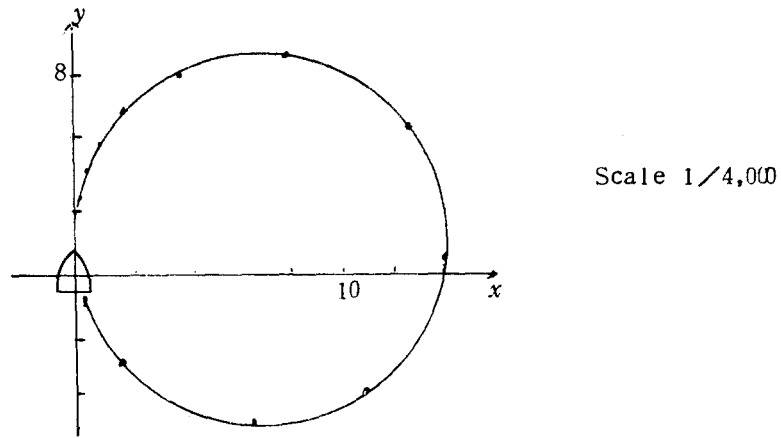


Fig. 10 Turning circle at port 15 degree rudder due to buoy method test

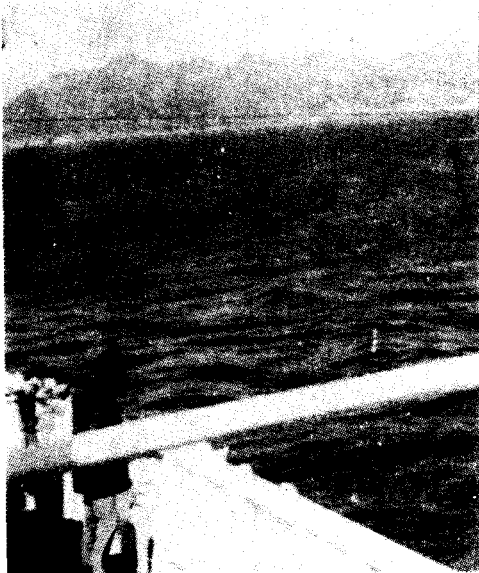


**Table 6.** Coordinate displacements at starboard 15 degree rudder due to buoy method turning test

$\phi$	0°	5°	15°	30°	45°	60°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
$p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x$	0	0.1	0.2	0.5	1.3	2.8	6.7	11.6	13.8	11.2	5.9	2.1	0.8
$y$	0	2.6	3.5	4.3	5.8	6.9	8.1	5.8	0.4	-4.6	-5.9	-3.7	-0.5



**Fig. 11** Turning circle at starbord 15 degree rudder due to buoy method test



**Fig. 12** Anchored buoy viewed from M/V Han Bada



**Fig. 13** A view of taking buoy bearing at the forecastle

2. 旋回角과 旋回中の 速力에 依한 旋回圈測定法 및 旋回圈圖<sup>5,6)</sup>

各 旋回角에 對한 經過時間 및 瞬間速力을 測定하여 旋回中の 分速度  $v \sin \phi$ ,  $v \cos \phi$  曲線을 求하여 이 曲線에서 planimeter 로 積分曲線을 求하여 任意 時刻에서의  $x$  및  $y$ 의 값을 求하여 轉心の 軌跡을 얻었다.

轉心과 重心과의 距離는 微小하므로 無視하고 轉心の 軌跡을 旋回圈으로 하였다.

[Left turn]

Table 7. hard port; Initial speed 10.5<sup>Kt</sup>

Position	Turn Angle	Time taken (sec)	ship's Speed(Kt)
1	0°	0	10.5
2	5°	11	10.2
3	15°	20	9.0
4	30°	30	7.9
5	45°	42	7.6
6	60°	53	7.1
7	90°	75	6.1
8	135°	110	5.7
9	180°	135	5.4
10	225°	186	5.4
11	270°	226	5.9
12	315°	270	6.1
13	360°	316	5.9

Table 8. Port(15°); Initial speed 10.2<sup>Kt</sup>

Position	Turn Angle	Time taken (sec)	Ship's speed (Kt)
1	0°	0	10.2
2	5°	13	10.1
3	15°	25	9.8
4	30°	42	9.2
5	45°	59	8.9
6	60°	76	8.7
7	90°	109	8.8
8	135°	161	8.5
9	180°	213	8.1
10	225°	268	8.5

11	270°	326	8.5
12	315°	383	7.7
13	360°	434	8.1

**Table 9.** [Right turn] hard Sta'd: Initial Spppd 10.6<sup>Kt</sup>

Position	Turn Angle	Time taken (sec)	Ship's speed (Kt)
1	0°	0	10.6
2	5°	11	10.5
3	15°	20	10.1
4	30°	32	9.6
5	45°	41	8.9
6	60°	56	7.7
7	90°	83	6.8
8	135°	121	5.9
9	180°	168	5.5
10	225°	195	5.5
11	270°	233	5.6
12	315°	274	5.7
13	360°	313	6.0

**Table 10.** Starboard 15°; Initial speed 10.3<sup>Kt</sup>

Position	Turn Angle	Time taken (sec)	Ship's Speed (Kt)
1	0°	0	10.3
2	5°	12	10.1
3	15°	25	9.9
4	30°	44	9.5
5	45°	64	9.0
6	60°	83	9.0
7	90°	105	8.8
8	135°	171	8.9
9	180°	209	8.8
10	225°	270	8.6
11	270°	331	8.2
12	315°	385	8.2
13	360°	440	8.3

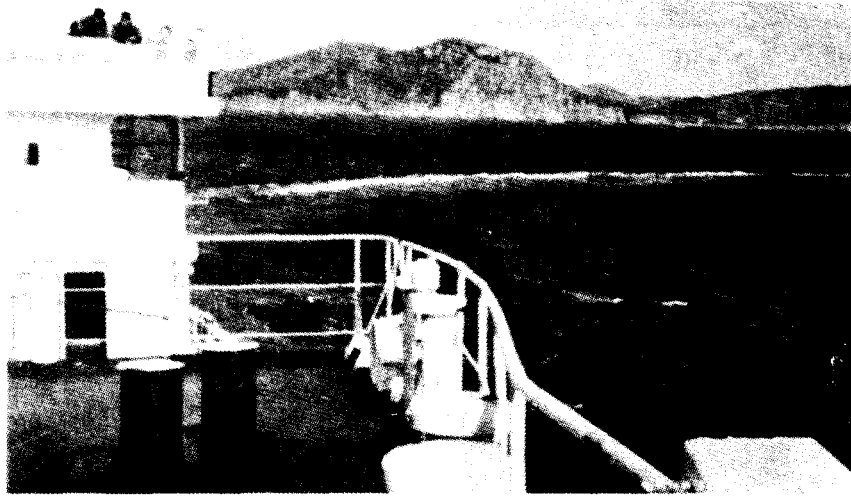


Fig. 14 A view of turning test.

Table 11. Coordinate displacements due to the method of the heading angle and speed.  
(hard port, 35°)

$\rho$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x$	0	0.2	0.5	0.8	1.7	2.6	4.9	6.6	7.7	6.5	3.9	2.6	1.1
$y$	0	3.3	3.6	4.6	5.4	5.9	6.2	5.2	3.6	-0.6	-1.3	-1.1	1.6

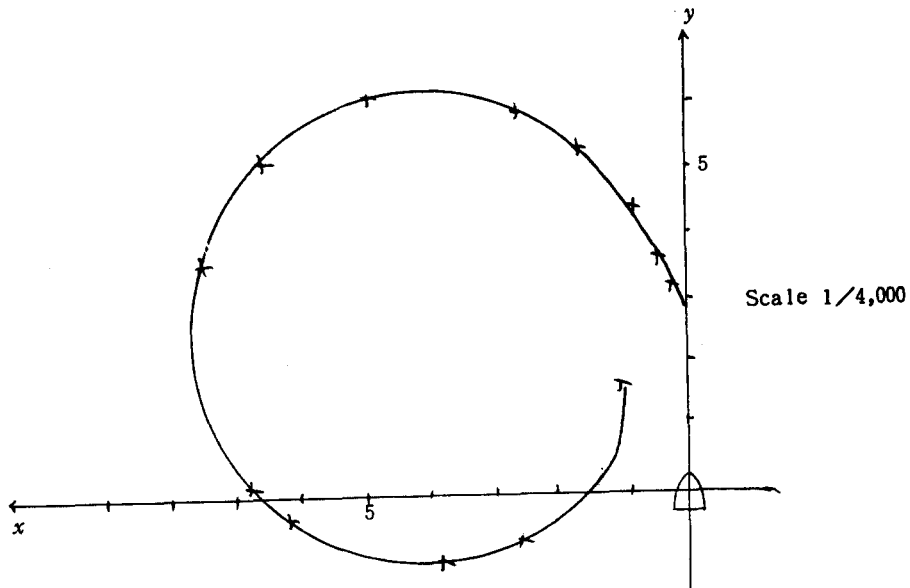
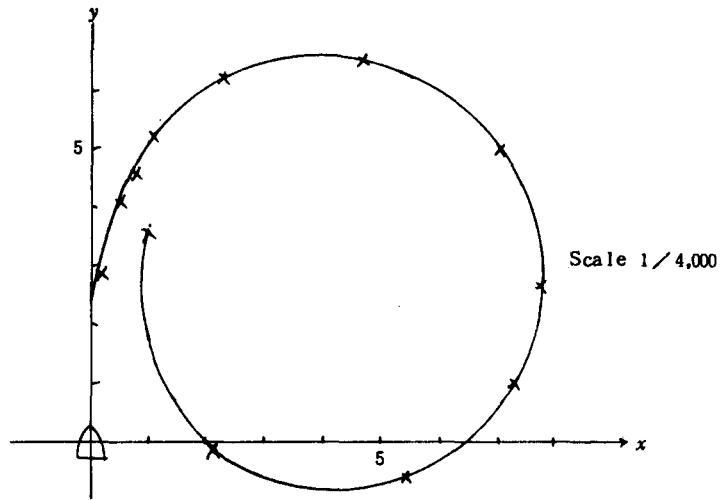


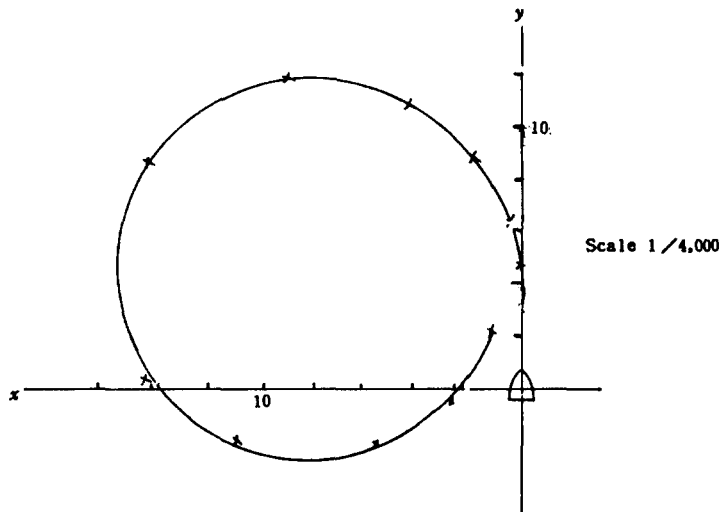
Fig. 15 Turning circle at port 35 degree rudder due to the heading angle and speed method

**Table 12.** Coordinate displacements due to the method of the heading angle and speed.  
(hard starboard, 35°)

$p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x$	0	0.2	0.5	0.7	1.1	2.3	4.7	7.3	7.9	7.3	5.7	2.1	1
$y$	0	2.9	4.1	4.6	5.2	6	6.5	5.2	2.7	0.9	-0.4	-0.1	3.7



**Fig. 16** Turning circle at starboard 35 degree rudder due to the heading angle and speed method.



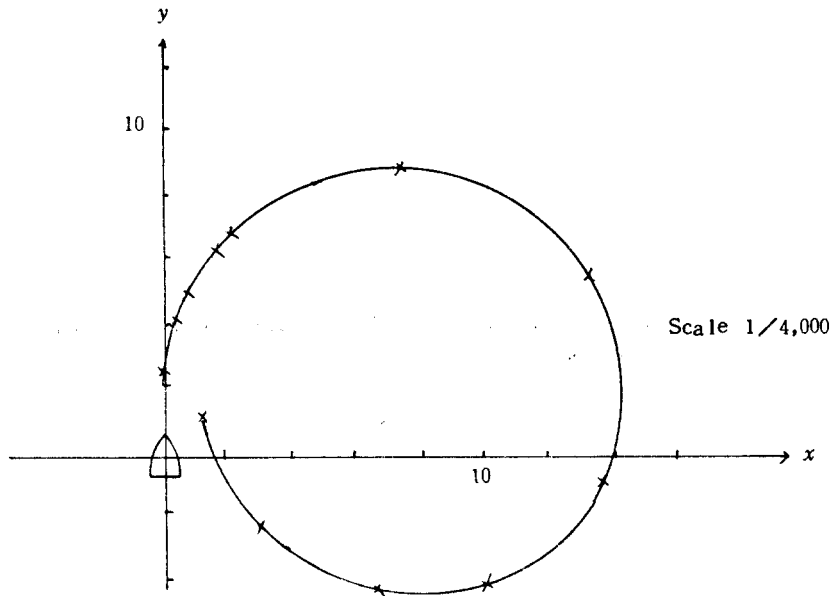
**Fig. 17** Turning circle at port 15 degree rudder due to the heading angle and speed method.

**Table 13.** Coordinate displacements due to the method of the heading angle and speed.  
(port, 15°)

$\rho$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x$	0	0	0.1	0.3	1.4	2.8	6.7	11.3	13.5	11.2	5.5	2.2	1.1
$y$	0	1.6	2.4	4.1	5.7	7	8.4	6.3	0.2	-2.2	-2.7	-1.4	1.5

**Table 14.** Coordinate displacements due to the method of the heading angle and speed.  
(Starboard, 15°)

$\rho$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x$	0	0	0.2	0.7	1.5	2.1	7.4	12.5	13.5	10	6.7	3.6	1.5
$y$	0	2.6	4	4.8	6.2	7	9	6.2	-0.5	-3.8	-3.9	-2.5	1



**Fig. 18** Turning circle at starboard 15 degree rudder due to the heading angle and speed method.

### 3. Z 試驗에 의한 旋回圈

#### (1) Z 試驗 方法<sup>6,7,8)</sup>

本 試驗을 위하여 操舵室에 研究補助員 6 名을 動員하여 1 名은 定한 信號에 따라서 舵을 左右로 잡아 所定의 舵角에 이르도록 操舵命令을 하게 하였으며, 1 名은 stop watch 를 가지고 Zero time 으로부터 適當한 時間間隔(5 秒, 10 秒, 15 秒……)으로 時間을 읽도록 하였다. 1 名은 Course recorder 에 配置하여 船首方位를 읽도록 하고 2 名은 미리 마련된 用紙에 各 time 에 맞추어 船首方位를 記

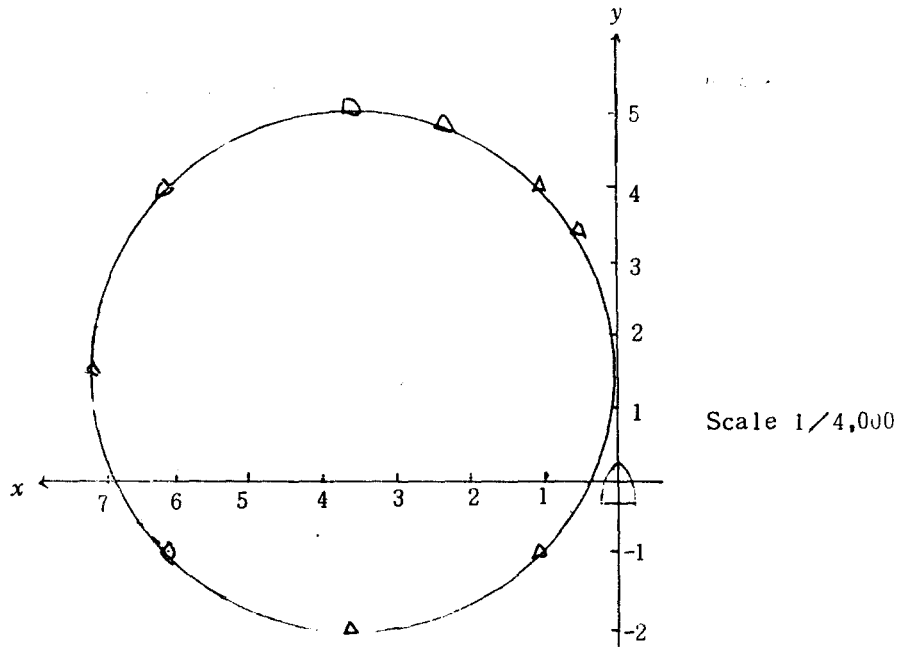
錄토록 하였다. 나머지 1名은 船首方位와 舵角을 比較하여 舵角과 船首方位가 같아질때 信號를 하면서 主要時點의 舵角, 船首方位 및 時間을 記錄토록 하였다.

(2) 計算에 의한 旋回圈圖

위의 試驗 結果에서 計算한 旋回圈에 對한 數値는 Table 15, 16 과 같고 旋回圈圖는 Fig. 19, 20과 같다.

**Table 15.** Coordinate displacements calculated from maneuvering indices.  
(35° Z test)

$\phi$	0°	5°	15°	30°	45°	60°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
$p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$y$	0	0	0.1	0.5	1.0	2.3	3.6	6.1	7.1	6.1	3.6	1.0	0
$y$	1.1	1.9	2.5	3.3	4.1	4.9	5.1	4.1	1.1	-1	-2	-1	1.1



**Fig. 19** Turning circle figured out from Z test of 35 rudder angle.

**Table 16.** Coordinate displacements calculated from maneuvering indices. (15° Z test)

$\phi$	0°	5°	15°	30°	45°	60°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
$p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x$	0	0.1	0.3	0.9	1.9	3.4	6.7	11.4	13.4	11.4	6.7	1.9	0
$y$	1.3	1.8	3	4.5	5.8	7	7.8	5.8	1.3	-3.6	-5.6	-3.6	1.3

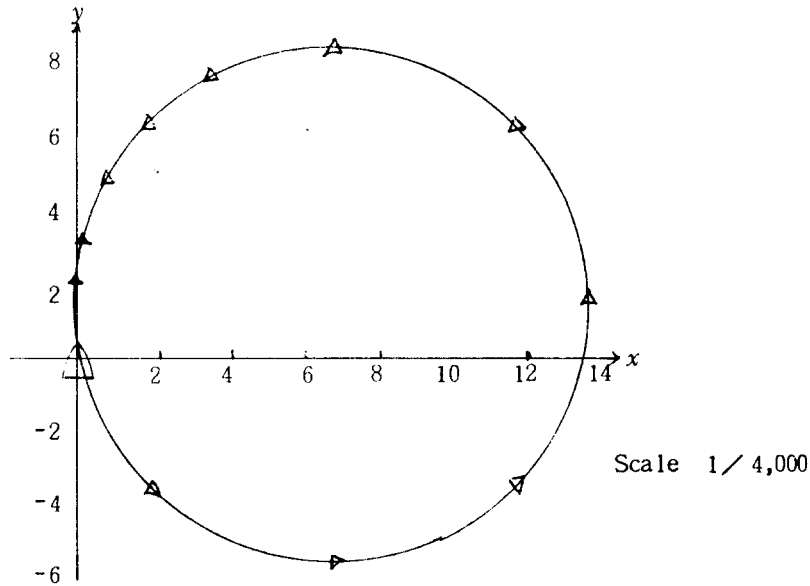


Fig. 20 Turning circle figured out from Z test of 15 rudder angle.



Fig. 21 A testing view inside the bridge of M/V Han Bada.

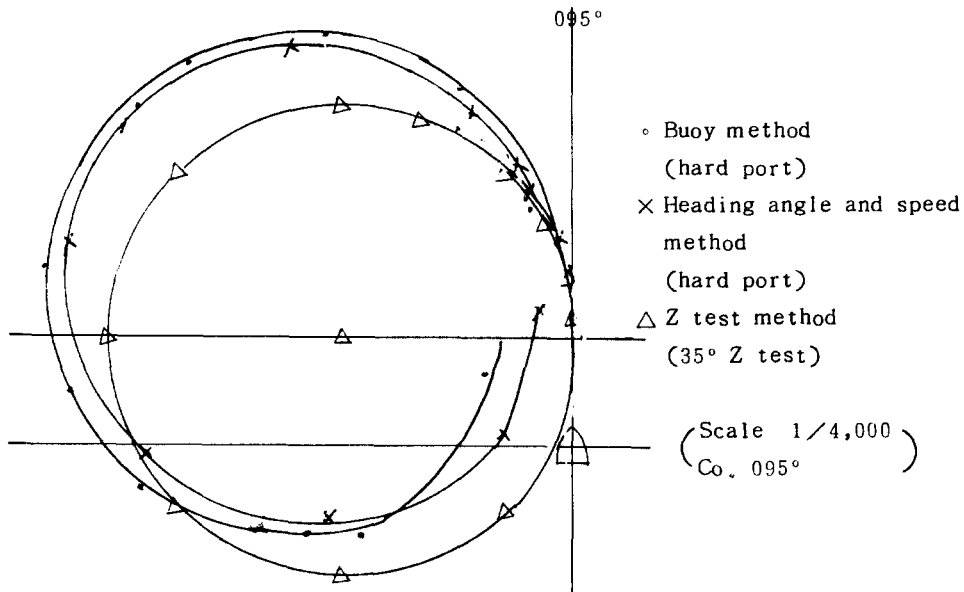
#### 4. 各 旋回圈의 比較

實船 試驗에 依하여 作圖한 旋回圈과 Z試驗에 依한 旋回圈 및 船速과 旋回角에 依한 旋回圈을 比較하면 다음 Table 및 Fig 와 같다.



**Table 17.** Full speed hard port (35°)

	Buoy method	Heading angle and speed method	Z test method
Tactical diameter	320m	308m	286m
Advance	252	240	203
Transfer	152	176	143
Reach	112	104	60
Coordinates	x	160	143
	y	112	60



**Fig. 22** Turning circles at hard port rudder angle.

**Table 18.** Hard Starboard (35°)

	Buoy method	Heading angle and speed method	Z test method
Tactical diameter	316m	368m	286m
Advance	256	280	203
Transfer	184	188	143
Reach	120	116	60
Coordinates	x	168	143
	y	120	60

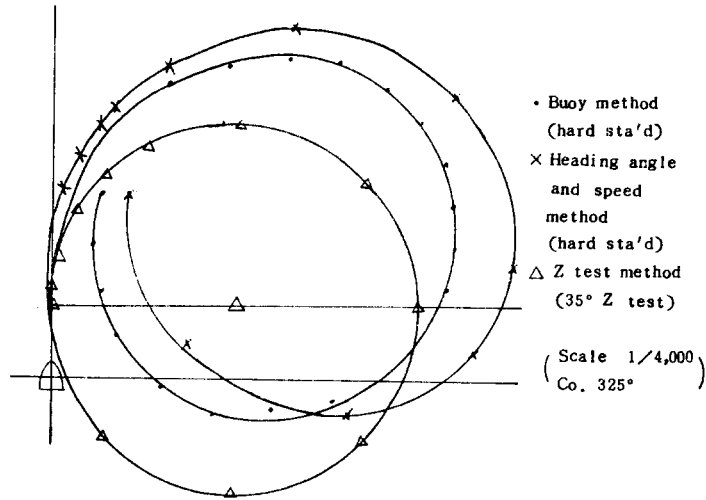


Fig. 23 Turning circles hard starboard rudder.

Table 19. Port (15°)

	Buoy method	Heading angle and speed method	Z test method
Tactical diameter	536m	552m	544m
Advance	340	336	327
Transfer	336	328	272
Reach	84	84	55
Coordinates $\begin{cases} x \\ y \end{cases}$	$\begin{cases} 272 \\ 84 \end{cases}$	$\begin{cases} 280 \\ 84 \end{cases}$	$\begin{cases} 272 \\ 55 \end{cases}$

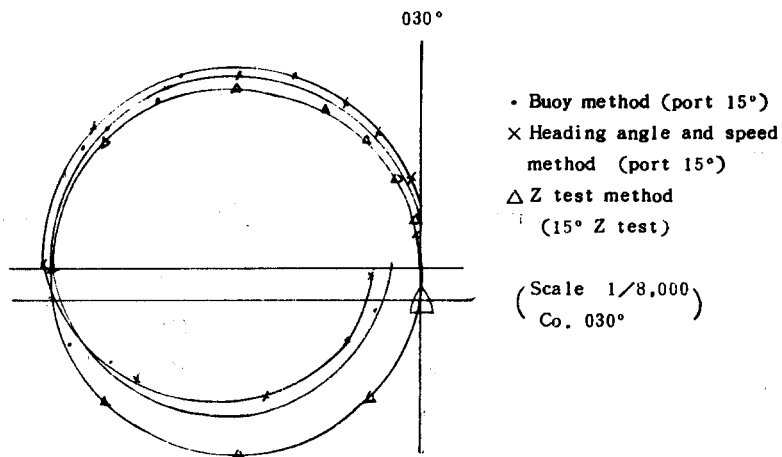


Fig. 24 Turning circles at port 15 rudder angle.



Fig. 25 A view of taking buoy bearing at the poop deck.

Table 20. Starboard (15°)

	Buoy method	Heading angle and speed method	Z test method
Tactical diameter	568m	552m	544m
Advance	360	320	327
Transfer	356	320	272
Reach	88	32	55
Coordinates $\begin{cases} x \\ y \end{cases}$	$\begin{cases} 284 \\ 88 \end{cases}$	$\begin{cases} 280 \\ 32 \end{cases}$	$\begin{cases} 272 \\ 55 \end{cases}$

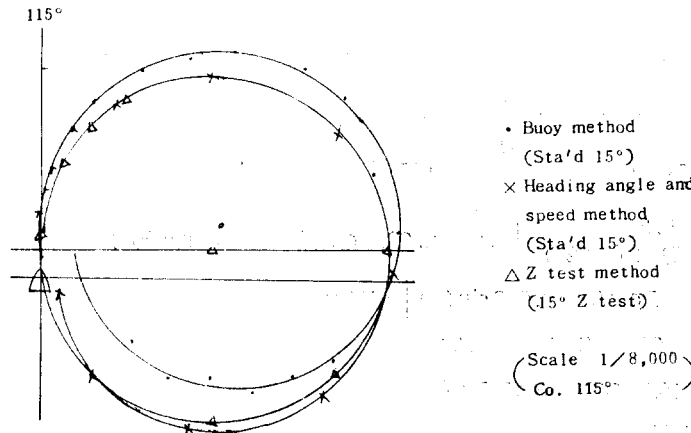


Fig. 26 Turning circles at starboard 15 rudder angle.

#### IV. 試驗結果에 對한 考察

##### 1. 各 旋回圈의 크기에 對한 考察

Z試驗에 依한 旋回圈은 15° 및 35° 舵角에서 모두 線形理論에 依하여 計算된 것이므로 35° Z試驗結果는 流體力學的인 側面에서 볼 때 그 때의 實船 旋回圈보다 클것이 豫想되었고 15° Z試驗結果는 實船 旋回圈과 거의 같을 것으로 豫想되었으나 結果는 그렇지 아니하였다.

그리고 旋回圈 作圖를 爲한 浮標, 方位盤法 速力과 旋回角에 의한 方法, Z試驗에 依한 方法들이 理論上의 差異가 있으면서도 豫想과는 달리 相當히 잘 一致하고 있다.

##### 2. 試驗條件에 依한 影響

本試驗은 風力 3, trim 2.2m by the stern에서 行하였기 때문에 風力의 影響에 依하여 豫想되었던 대로 浮標, 方位盤法에 依한 旋回圈, 船速과 旋回角에 依한 旋回圈이 旋回半徑의 크기에서는 거의 一致하였으나 旋回圈 中心位置에서는 一致하지 않았다. 可能하면 風力 0, 또는 1 程度가 좋으며 風力 4 以上에서의 試驗은 困難하다고 본다.

그리고 trim by the stern의 影響으로 T는 커지고 K는 작아질 수도 있음을 考慮해야 正確한 값을 얻을 수 있을 것인데 이것을 無視하였기 때문에 微小한 差가 있을 것으로 본다.

#### V. 實旋回에 一致시키기 爲한 Z試驗 旋回圈의 修正에 對한 數值計算

##### 1. Hard over (35°) turn時

$$x_1 = \int_0^{t_1} v_0 e^{at} \sin \omega t, dt = v_0 \left[ \frac{e^{at}}{a^2 + \omega^2} (a \sin \omega t - \omega \cos \omega t) \right]_0^{t_1}$$

$$= \frac{5.3}{(-0.0075)^2 + (0.0023)^2} \left[ 0.6(-0.0075 \sin 90^\circ - 0.023 \cos 90^\circ) - 1(-0.0075 \sin 0^\circ - 0.023 \cos 0^\circ) \right] = 168\text{m}$$

$$y_1 = \int_0^{t_1} v_0 e^{at} \cos \omega t, dt = v_0 \left[ \frac{e^{at}}{a^2 + \omega^2} (a \cos \omega t + \omega \sin \omega t) \right]_0^{t_1}$$

$$= \frac{5.3}{(-0.0075)^2 + (0.0023)^2} \left[ 0.6(-0.0075 \cos 90^\circ + 0.023 \sin 90^\circ) - 1(-0.0075 \cos 0^\circ + 0.023 \sin 0^\circ) \right] = 193\text{m}$$

$$\Delta x = x_1 - Rz_1 = 168 - 143 = 25\text{m} \doteq 1.7B$$

$$\Delta y = y_1 - Rz_1 = 193 - 143 = 50\text{m} \doteq 0.5L$$

따라서 Z試驗 旋回圈을

x 方向으로 1.7B

y 方向으로 0.5L 移動시키면  
 다음 Fig. 27, 28과 같이 實旋回圈과 一致한다.

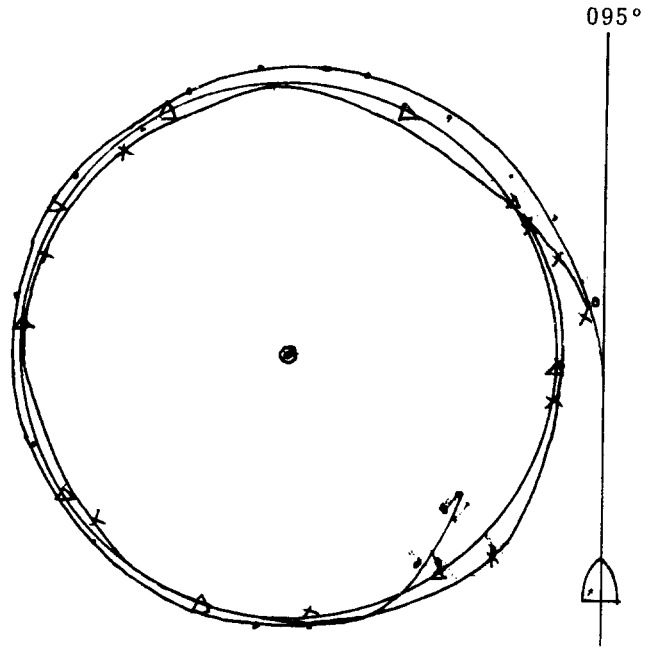


Fig. 27 Z test turning circle revised to actual turning circles (Port 35 degree rudder)

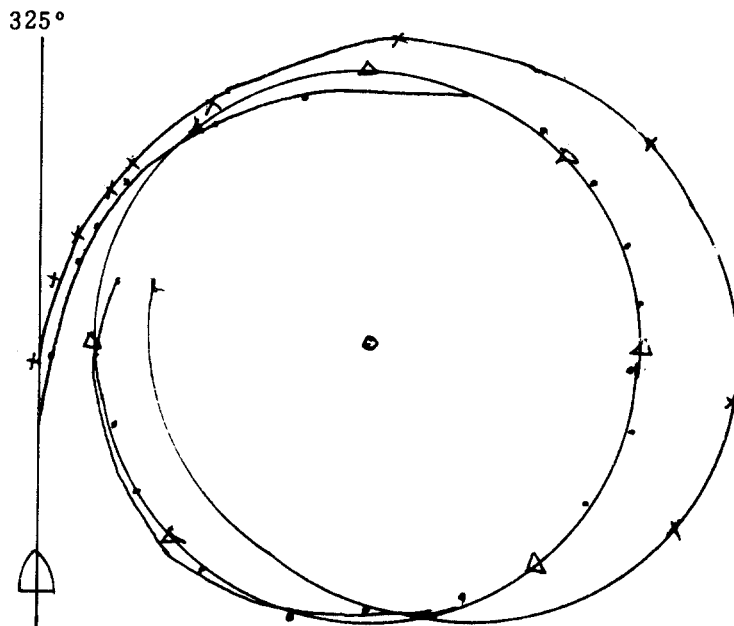


Fig. 28 Z test turning circles revised to actual turning circles. (Starboard 35 degree rudder)

2. 15° turn 時

$$x_2 = \int_0^{96} v_0 e^{at} \sin \omega t, dt = \left| \frac{5.2}{(-0.00169)^2 + (0.016)^2} \left[ 0.85(-0.00169 \sin 90^\circ - 0.016 \cos 90^\circ) - (-0.00169 \sin 0^\circ - 0.016 \cos 0^\circ) \right] \right| = 289\text{m}$$

$$y_2 = \int_0^{96} v_0 e^{at} \cos \omega t, dt = \left| \frac{5.2}{(-0.00169)^2 + (0.016)^2} \left[ 0.85(-0.00169 \cos 90^\circ - 0.016 \sin 90^\circ) - 1(-0.00169 \cos 0^\circ + 0.016 \sin 0^\circ) \right] \right| = 303\text{m}$$

$$4x = x_2 - R_{z_2} = 289 - 272 = 17\text{m} \approx 1.2B$$

$$4y = y_2 - R_{z_2} = 303 - 272 = 31\text{m} \approx 0.3L$$

따라서 Z 試驗 旋回圈을

x 方向으로 1.2B

y 方向으로 0.3L 移動시키면

Fig. 29, 30과 같이 實旋回圈과 一致한다.

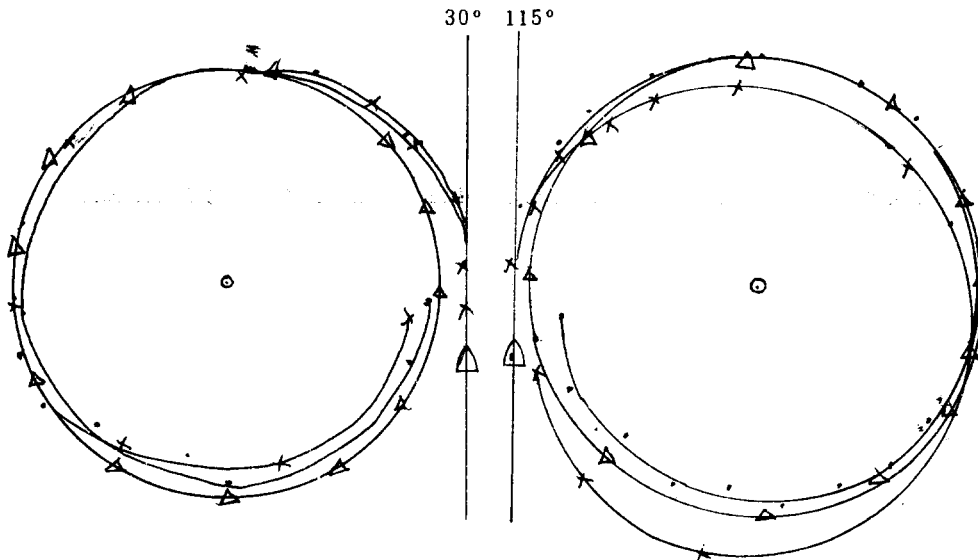


Fig. 29 Z test turning circle revised to actual turning circles. (Port 15 degree rudder)

Fig. 30 Z test turning circle revised to actual turning circles. (Starboard 15 degree rudder)

VI. 結 論

以上の 結果에서 다음의 結論을 얻는다.

1. 舵角 35°時 實船 旋回圈을 作圖하려면 35° Z 試驗 旋回圈을

x 方向으로 1.7B

y 方向으로 0.3L 座標 移動하면 된다.

2. 舵角  $15^\circ$ 時 實船 旋回圈을 作圖하려면  $15^\circ$  Z試驗 旋回圈을

$x$  方向으로  $1.2B$

$y$  方向으로  $0.3L$  座標 移動하면 된다.

3. 모든 積載 狀態에서 大洋航行中 簡單한 Z試驗으로 그때 그때의 船舶의 操縱 特性을 正確히 把握하여 實船 操船에 도움을 줄 수 있다. 이러한 方法을 取하면 複雜한 旋回試驗을 하지 않고도 旋回圈圖를 얻을 수 있으므로 經費節約을 期할 수 있다.

本 論文에서는 “한바다”호에 限하여서만 Z試驗을 하여 計算結果에서 얻은 旋回圈과 實際의 旋回圈이 舵角에 關係없이 거의 一致함을 알 수 있었다.

이것은 앞으로 여러 船舶의 試驗을 通하여 더욱 確認할 必要가 있을 것이다.

### 參 考 文 獻

1. 岩井聰, “操船論”, 海文堂, 東京(1977.3), pp.13~20.
2. PHILIP MANDEL, “Principles of Naval Architecture”, SNAME, New York(1967), p.470.
3. 赤崎繁, “船體旋回學”, 海文堂, 東京(1975.6), pp.82~83.
4. 大串雅信, “理論船舶工學 下”, 海文堂, 東京(1976.8), p.254.
5. 尹点東, “船舶運用的 理論과 實務”, 亞成出版社, 釜山(1977.8), p.52.
6. 杉原喜義, “理論運用學(船體運動論)”, 海文堂, 東京(1966.4), p.112.
7. 元良誠參, “船體運動力學”, 共立出版社, 東京(1964.8), p.11.
8. 金基允, “船體運動學的으로 본 衝突回避 動作에 관한 研究”, 釜山大學校 碩士學位請求論文(1979.2), p.26.
9. 尹点東, “操縱性指數에 의한 衝突回避動作의 量的 把握에 관한 研究”, 韓國海洋大學論文集 Vol.12, pp.471~480.
10. 日本造船學會, “Proceedings of the 2nd Symposium on Ship Manoeuvrability”(1970.11), pp.2~3.
11. K. J. Rawson, “Basic Ship Theory Vol.2”, Longman group Ltd., London and N. Y. (1976), pp.486~500.
12. 日本海亂防止協會, “超大型船操船 9手引き”, 日本海亂防止協會, 東京(1970.3), p.32.
13. Austin. M. knight, “Modern Seamanship” D. Van Nostrand Company Inc., London(1966.9), pp.192~195.

## 附 錄

## Z 試 驗 資 料

Table 1. hard sta'd

t	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
H. d	240	241	244	250	256	263	270	277	283	285	285	280	
t	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	
H. d	273	266	261	253	246	240	234	227	221	215	209	203	
t	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	
H. d	197	194	194	196	201	207	213	219	225	231	238	244	
t	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	
H. d	250	256	263	268	275	280	285	286	284	280	274	266	
t	240	245	250	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300
H. d	260	254	247	241									
p (time point)		t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>			
t Passed time)		14	34	44	47.5	54	85	114	124	127.5			
p (time point)		t <sub>10</sub>	t <sub>11</sub>	t <sub>12</sub>	t <sub>13</sub>	t <sub>14</sub>	t <sub>15</sub>	t <sub>16</sub>					
t (time point)		134	172	200	210	215	220	257					

Table 2. Sta'd (15°)

t	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
H. d	060	060	062	065	068	072	075	079	079	077	074	071	
t	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	
H. d	067	063	059	054	051	047	042	040	041	043	045	047	
t	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	
H. d	051	054	057	060	064	067	071	074	078	079	078	075	
t	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	
H. d	072	068	064	060									
t	240	245	250	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300
H. d													
p		t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>	t <sub>10</sub>		
t		8	30	36	37	44	68	87	94	95	101		
p		t <sub>11</sub>	t <sub>12</sub>	t <sub>13</sub>	t <sub>14</sub>	t <sub>15</sub>	t <sub>16</sub>						
t		135	157	163	164	171	195						



**Table 3.** Hard Port

t	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
H. d	240	240	237	232	225	218	211	205	198	194	193	196	
t	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	
H. d	200	206	212	219	225	231	233	244	250	256	263	270	
t	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	
H. d	275	281	285	286	283	277	272	265	258	252	245	239	
t	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	
H. d	233	227	221	217	210	204	199	196	197	200	205	210	
t	240	245	250	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300
H. d	216	222	228	235	241								
p	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>	t <sub>10</sub>			
t	14	35	47	59	59	92	120	132	135	144			
p	t <sub>11</sub>	t <sub>12</sub>	t <sub>13</sub>	t <sub>14</sub>	t <sub>15</sub>	t <sub>16</sub>							
t	174	203	215	217	227	259							

**Table 4.** Port (15°)

t	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
H. d	060	060	058	054	051	046	042	039	040	042	045	048	
t	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	
H. d	051	055	058	061	065	069	072	076	079	080	078	075	
t	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	
H. d	072	067	063	058	054	049	045	040	039	040	043	046	
t	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	
H. d	049	053	056	060									
t	240	245	250	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300
H. d													
p	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>	t <sub>10</sub>			
t	8	26	32	35	38	74	94	100	105	106			
p	t <sub>11</sub>	t <sub>12</sub>	t <sub>13</sub>	t <sub>14</sub>	t <sub>15</sub>	t <sub>16</sub>							
t	133	149	155	160	161	195							

## Z 試驗計算

## 1. hard Sta'd

$$\textcircled{1} A_1 = -\frac{35}{2}(44+20) = 1120$$

$$A_2 = -\frac{35}{2}(80+60) = -2450$$

$$A_3 = -\frac{35}{2}(86+66) = 2660$$

$$\textcircled{2} A_e = A_1 - \frac{3 \times 11}{2} = 1103.5$$

$$A_e' = A_1 - A_2 + \frac{4 \times 15}{2} = -1300$$

$$A_e'' = A_1 - A_2 + A_3 - \frac{5 \times 17}{2} = 1287.5$$

$$\textcircled{3} A_o = A_1 - \frac{35}{2}(41+31) = -140$$

$$A_o' = A_1 - A_2 + \frac{35}{2}(48+38) = 175$$

$$A_o'' = A_1 - A_2 + A_3 - \frac{35}{2}(46+36) = -105$$

$$\textcircled{4} 45 = 47 k \delta r + K A_e \dots\dots\dots (1)$$

$$-47 = 128 k \delta r + K A_e' \dots\dots\dots (2)$$

$$46 = 215 k \delta r + K A_e'' \dots\dots\dots (3)$$

$$K \cdot 2.3 = 0.036 \qquad \delta r = -0.043$$

$$(1) \text{에 } \delta r \text{ 을 代入하여 } K_1 = 0.041/\text{sec}$$

$$K = 0.039/\text{sec}$$

$$\textcircled{5} -\frac{60}{47} T_1 = 0.039 \times (-0.043) \times 85 + 0.039 \times (-140)$$

$$-\frac{60}{48} T_2 = 0.039 \times (-0.043) \times 172 + 0.039 \times 175$$

$$-\frac{40}{31} T_3 = 0.039 \times (-0.043) \times 257 + 0.039 \times (-105)$$

$$T_1 = 5.396 \qquad T_2 = 3.152 \qquad T_3 = 6.515$$

$$T = \frac{T_1 + \frac{T_2 + T_3}{2}}{2} = 5.1(\text{sec})$$

## 2. hard Port

$$\textcircled{1} A_1 = -\frac{35}{2}(47+21) = -1190$$

$$A_2 = \frac{35}{2}(85 + 61) = 2555$$

$$A_3 = \frac{35}{2}(83 + 59) = -2485$$

$$\textcircled{2} A_e = -A_1 + \frac{3 \times 8}{2} = -1178$$

$$A_e' = -A_1 + A_2 - \frac{3 \times 9}{2} = 1351.5 = 1352$$

$$\textcircled{2} A_e'' = -A_1 + A_2 - A_3 + \frac{2 \times 8}{2} = -1112$$

$$\textcircled{3} A_e = -A_1 + \frac{35}{2}(45 + 33) = 175$$

$$A_e' = -A_1 + A_2 - \frac{35}{2}(42 + 30) = 105$$

$$A_e'' = -A_1 + A_2 - A_3 + \frac{35}{2}(44 + 32) = 210$$

$$\textcircled{4} -47 = 50 K \delta r + K A_e \dots\dots\dots(1)$$

$$46 = 135 K \delta r + K A_e' \dots\dots\dots(2)$$

$$-44 = 215 K \delta r + K A_e'' \dots\dots\dots(3)$$

$$K 2.3 = 0.036 \delta \qquad r = -0.55$$

(1)에  $\delta r$  을 代入 하여

$$K_1 = 0.041 \quad K = 0.039/\text{sec}$$

$$\textcircled{5} T_1 \frac{30}{47} = 0.039 \times (-0.55) \times 92 + 0.039 \times 175$$

$$T_2 \frac{30}{48} = 0.039 \times (-0.55) \times 174 + 0.039 \times 105$$

$$T_3 \frac{15}{24} = 0.039 \times (-0.55) \times 259 + 0.039 \times 210$$

$$T_1 = 7.5 \qquad T_2 = 0.45 \qquad T_3 = 4.5$$

$$T = \frac{T_1 + \frac{T_2 + T_3}{2}}{2} = 5.0(\text{sec})$$

3. Sta'd (15°)

$$\textcircled{1} A_1 = \frac{15}{2}(37 + 22) = 442.5$$

$$A_2 = \frac{15}{2}(58 + 43) = -757.5$$

$$A_3 = \frac{15}{2}(70 + 55) = 937.5$$

$$\textcircled{2} A_e = A_1 - \frac{1 \times 2}{2} = 441.5$$

$$A_e' = A_1 - A_2 + \frac{1 \times 2}{2} = -314$$

$$A_e'' = A_1 - A_2 + A_3 - \frac{1 \times 2}{2} = 621.5$$

$$\textcircled{3} A_e = A_1 - \frac{15}{2} (31 + 24) = 30$$

$$A_e' = A_1 - A_2 + \frac{15}{2} (41 + 34) = 247.5$$

$$A_e'' = A_1 - A_2 + A_3 - \frac{15}{2} (31 + 24) = 210$$

$$\textcircled{4} 20 = 37.5 k\delta r + KA_e \dots\dots\dots (1)$$

$$-20 = 94.5 k\delta r + KA_e' \dots\dots\dots (2)$$

$$19 = 164 k\delta r + KA_e'' \dots\dots\dots (3)$$

$$K \cdot 2.3 = 0.046 \qquad \delta r = -1.278$$

(1)式에  $\delta r$  를 代入하여

$$K_1 = 0.051 \qquad K = 0.049/\text{sec}$$

$$\textcircled{5} -T_1 \frac{20}{37} = 0.049 \times (-1.28) \times 68 + 0.049 \times 30$$

$$T_2 \frac{20}{45} = 0.049 \times (-1.28) \times 135 + 0.049 \times 247.5$$

$$-T_3 \frac{10}{15} = 0.049 \times (-1.28) \times 195 + 0.049 \times 210$$

$$T_1 = 5.166 \qquad T_2 = 8.244 \qquad T_3 = 2.909$$

$$T = \frac{T_1 + \frac{T_2 + T_3}{2}}{2} \doteq 5.4(\text{sec})$$

**4. Port (15°)**

$$\textcircled{1} A_1 = \frac{15}{2} (32 + 18) = -375$$

$$A_2 = \frac{15}{2} (68 + 56) = 930$$

$$A_3 = \frac{15}{2} (55 + 43) = -735$$

$$\textcircled{2} A_e = -A_1 + \frac{5.5 \times 14}{2} = -336.5$$

$$A_e' = -A_1 + A_2 - \frac{5 \times 13}{2} = 522.5$$

$$A_e'' = -A_1 + A_2 - A_3 + \frac{5 \times 13}{2} = -147.5$$

$$\textcircled{3} A_e = -A_1 + \frac{15}{2} (42 + 36) = 210$$

$$A_e' = -A_1 + A_2 - \frac{15}{2} (33 + 27) = -105$$

$$A_e'' = -A_1 + A_2 - A_3 + \frac{15}{2} (40 + 34) = 375$$

④  $-21 = 35 k\delta r + K(-336.1) \dots\dots\dots (1)$

$20 = 105 k\delta r + K \cdot 522.5 \dots\dots\dots (2)$

$-21 = 160 k\delta r + K(-147.5) \dots\dots\dots (3)$

$K \cdot 2.3 = 0.055 \qquad \delta r = -1.48$

(1)式에  $\delta r$  을 代入하여  $K_1 = 0.054$

$K = 0.054$

⑤  $T_1 \frac{46}{44} = 0.054 \times (-1.48) \times 74 + 0.054 \times 210$

$-T_2 \frac{35}{33} = 0.054 \times (-1.48) \times 133 + 0.054 \times (-105)$

$T_3 \frac{25}{20} = 0.054 \times (-1.48) \times 195 + 0.054 \times 375$

$T_1 = 5.19 \qquad T_2 = 15.37 \qquad T_3 = 3.7$

$T = \frac{1 + \frac{1}{2} T_3}{2} = 7.36(\text{sec})$

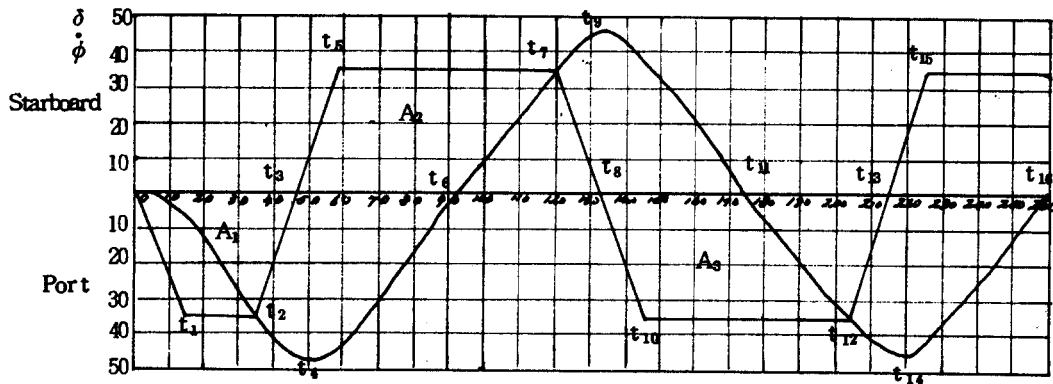


Fig. 1 hard port

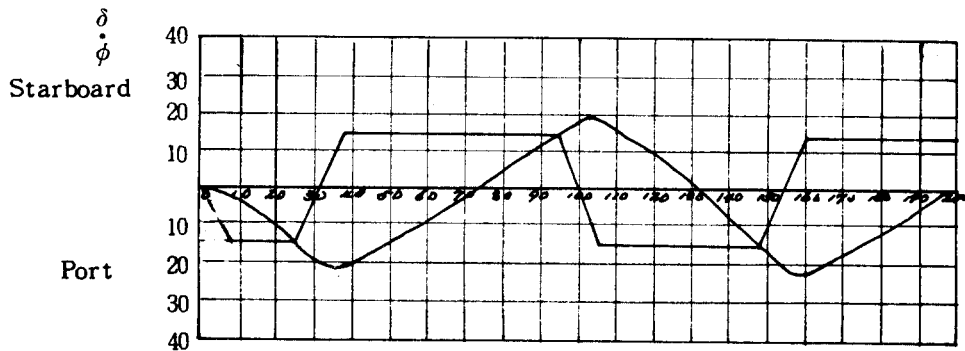


Fig. 2 Port (15°)

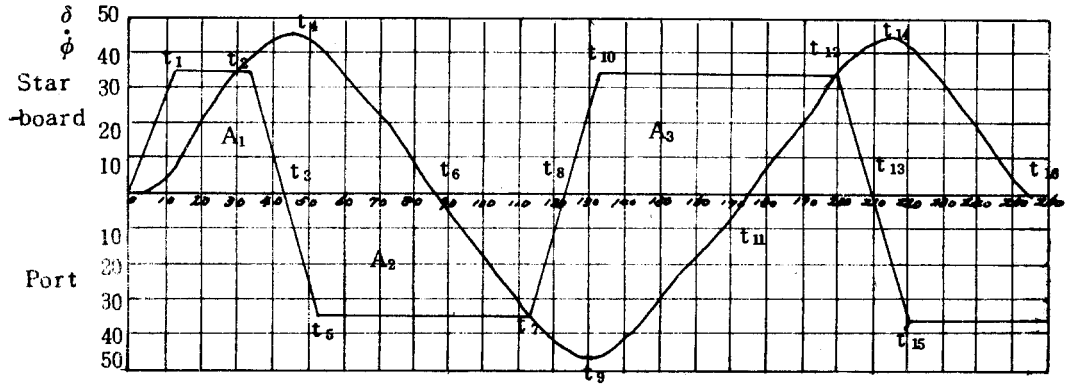


Fig. 3 hard Sta'd

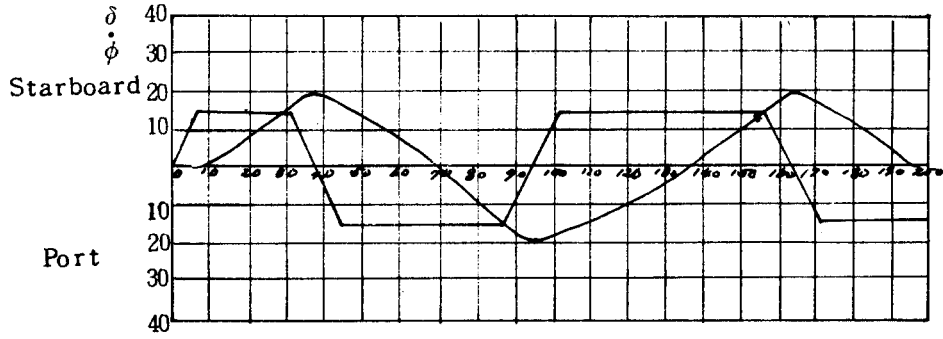


Fig. 4 Sta'd (15°)