

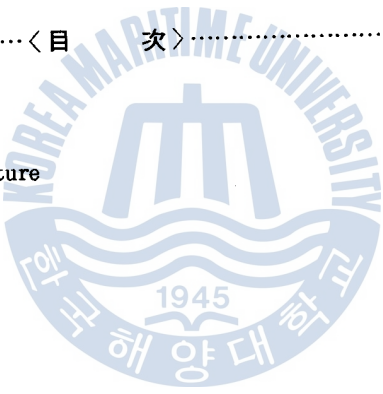
Box-type浮遊式 構造物の 横復原力에 미치는 bulwark의 영향에 관한 研究

尹 明 五

On the Effect of Bulwark on Transverse
Stability of Box-type Floating Structure

Yun Myung-o

〈目 次〉

- 
- Abstract
- Nomenclature
- I. 序 論
- II. 理論計算
1. 定式化
 2. 復原아압의 計算法
- III. 實 驗
1. 實驗裝置 및 模型船의 明細
 2. 實驗方法
- IV. 理論計算과 實驗結果의 比較 檢討
- V. 結 論
- 參考文獻

ABSTRACT

As per the expanding needs of marine exploitation, many floating structures have been built. Among these, box-type floating body is considered as the most basic shape, to which plant barges and crane barges belong.

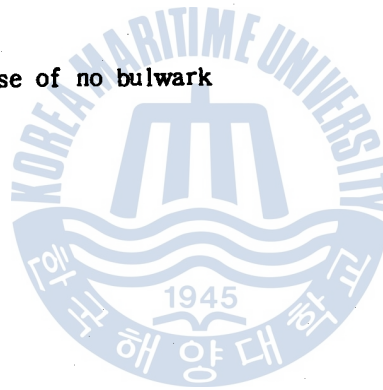
Stability problem is very important for floating bodies. In order to increase transverse stability, this paper employs bulwarks along the upper deck sides of box-type floating body and the emphasis is laid upon the effect of bulwark on transverse stability.

In the present paper, the calculation method of heeling moment acting to the ship due to hydrostatic pressure is suggested and actual procedures of the calculation for box-type floating body with bulwarks are shown. Furthermore corresponding model tests are carried out in small water tank.

Through the comparison between calculated and measured values, it is confirmed that the present calculation method is useful. And employing bulwarks on floating body is very effective for increase of transverse stability at the heeling angles about 15 ~ 30 degrees.

NOMENCLATURE

- B : breadth of ship
 B : center of buoyancy
 b : breadth of bulwark
 D : depth from bottom to bulwark top
 d : draft
 f : freeboard
 G : Center of gravity
 g : gravity accelation
 GM : metacentric height
 \overline{GZ} : righting arm
 $[\overline{GZ}]_0$: righting arm in case of no bulwark
 \overline{GZ}_d : dynamic righting arm
 K : heeling moment
 L : length of ship
 P : hydrostatic pressure
 V : displacement volume
 W : weight of ship
 Y : lateral force by hydrostatic pressure
 Z : heaving force by hydrostatic pressure
 z_G : z coordinate of center of gravity
 z_w : z coordinate of water plane
 o-yz : coordinate system fixed in the ship
 $\sigma-\eta\zeta$: coordinate system fixed relative to earth
 ϕ : heeling angle of ship(deg.)
 ρ : density of water
 ζ_0 : sinkage of ship



I. 序 論

近年 海洋空間, 海洋資源 및 海洋에너지 등의 利用을 위한 海洋開發의 필요성으로 인하여 海洋構造物의 利用도와 그 需要가 점차 增大되고 있다.

海洋構造物은 用途에 따라 형태가 多樣하며 plant barge 船, 半潛水型 crane barge 船 그리고 一般作業船 등과 같은 box-type 浮遊式 構造物¹⁾ (以下 箱子形 浮體라 칭함)은 海洋構造物의 가장 基本的인 형상으로서 1970 年代 中下半期부터 많이 建造되고 있다.²⁾

浮遊構造物이 갖추어야 할 基本的인 性能으로서는 復原性能과 耐波性能이 있을 것이며 本 論文에서는 復原性能 향상의 한 방안으로 水密 bulwark를 설치한 箱子形 浮體에 있어서 이 bulwark의 效能을 중심으로 한 復原性能 問題를 다루고자 하였다.

船舶의 復原性能 向上方法에 대해서는 지금까지 많은 研究가 수행되어 왔으나 小型漁船에서 많이 採用되고 있는 突出型 bulwark가 復原性能에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 研究發表된 論文이 없는 듯하다.

本 論文에서는 箱子形 浮體의 上甲板 兩舷側에 水密 bulwark를 설치하였을 때 이 bulwark가 復原性能에 미치는 영향을 流體靜力學的 理論計算에 의해 定量的으로 구하고 實驗을 병행하였다.

그리하여 本 計算方法의 타당성을 立證하였으며 bulwark의 形狀變化가 復原性能에 미치는 영향을 종합적으로 評價하였다.

II. 理論 計算

1. 定式化

海上 plant barge 및 작업선 등의 실제형상은 Fig.2-1과 같다.³⁾ 그러나 理論計算의 편의를 위해 Fig.2-2와 같이 직사각형의 等斷面을 갖는 box-type barge로 간주한다. 그리고 上甲板 兩舷側에는 等斷面을 갖는 水密 bulwark가 設置되어 있다고 가정한다.

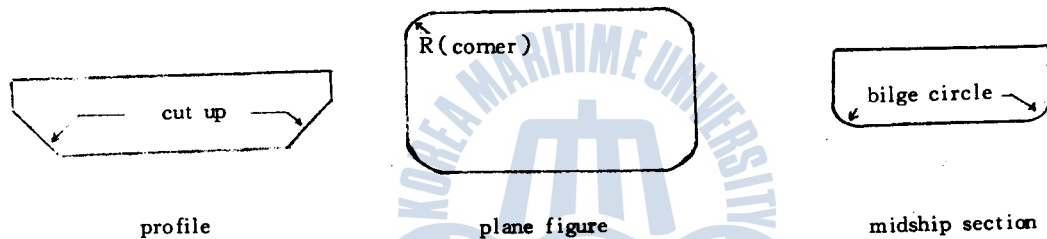


Fig.2-1 Typical shape of actual barge

靜水中에서 이 水密 bulwark가 船體의 橫復原性能에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 여러 橫傾斜角에 대한 復原 아암(arm)이 어떻게 變化하는가를 計算한다. 그렇게 함으로써 水密 bulwark의 效用이 明確해질 것이다.

本 論文에서는 靜水中에서의 復原性能만을 論하기 때문에 波浪에 의한 甲板 水 流入의 영향은 고려하지 아니한다.

1) 座標系

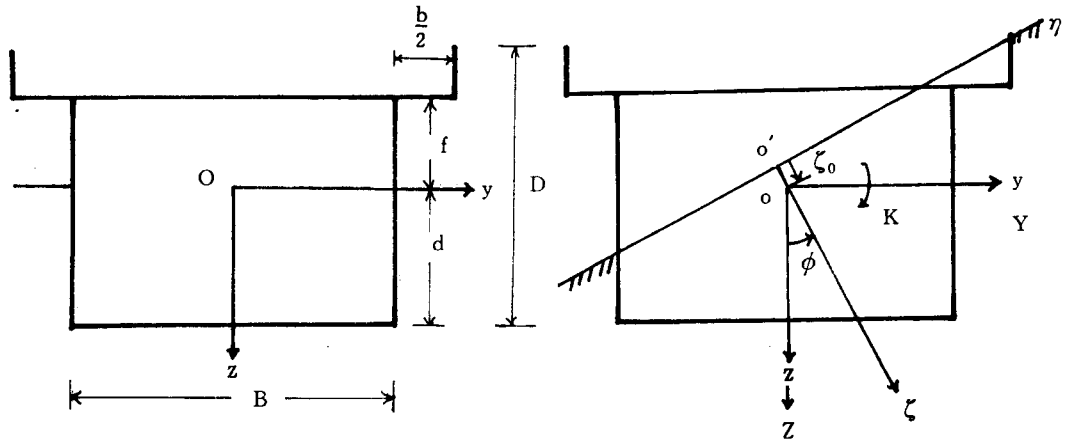


Fig.2-2 Cross section of box-type barge and coordinate system.

(1) 船體固定 座標系 (o-yz)

傾斜角 $\phi = 0$ 일때의 水面을 y軸으로 취하고, 船體의 中心線을 지나고 y軸에 垂直하게 下方으로 z軸을 취한다.

(2) 空間固定座標系 (o'-ηζ)

傾斜에 관계없이 水面을 η軸으로 취하고 o점을 지나고 η軸에 垂直하게 下方으로 ζ軸을 취한다. 그리고 座標原點 o'는 η軸과 ζ軸의 交점에 있다.

여기에서 o점의 ζ座標를 ζ_0 라 하면 ζ_0 는 船體沈下量이 된다.

橫傾斜角을 ϕ 라 할 때 船體固定座標系 o-yz와 空間固定座標系 o'-ηζ와는 다음의 관계가 성립한다.⁴⁾

$$\left. \begin{aligned} \eta &= y \cos \phi - z \sin \phi \\ \zeta &= \zeta_0 + y \sin \phi + z \cos \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

2) 靜水壓과 橫傾斜 모우먼트

船體에 作用하는 靜水壓은 流體靜力學에서 다음 식으로 表示된다.

$$P = \rho g \zeta \dots\dots\dots (2)$$

(2)式을 船體固定座標系를 써서 표시하면 다음과 같다.

$$P = \rho g (\zeta_0 + y \sin \phi + z \cos \phi) \dots\dots\dots (3)$$

船體에 作用하는 힘과 모우먼트는 水面下部의 船體表面에 作用하는 壓力 P에 의해 發生하는 것으로 水面下部의 船體表面積을 S, 水面下部의 船體容積을 V, 船體表面에 세운 外向의 單位法線 벡타를 $\mathbf{n} (n_x, n_y, n_z)$, 원점 o로부터 水線下 船體表面의 點까지의 위치 벡타를 $\mathbf{r}(y, z)$ 라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁵⁾

$$\mathbf{F}_s = - \iint_s P \mathbf{n} ds \dots\dots\dots (4)$$

$$\mathbf{M}_s = - \iint_s \mathbf{r} \times P \mathbf{n} ds \dots\dots\dots (5)$$

船體의 y, z 軸 方向으로 作用하는 힘을 각각 Y, Z라 하고 o점 주위의 橫傾斜 모우먼트를 K라 하면 Y, Z, K는 (4), (5)式으로부터 다음과 같이 表示된다.

$$Y = - \iint_s P n_y ds \dots\dots\dots (4-1)$$

$$Z = - \iint_s P n_z ds \dots\dots\dots (4-2)$$

$$K = - \iint_s P (y n_z - z n_y) ds \dots\dots\dots (5-1)$$

Y, Z, K는 面積積分을 體積積分으로 변환하는 Gauss의 정리⁶⁾를 利用하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Y = -\iiint_V \frac{\partial p}{\partial y} dV \dots\dots\dots (6)$$

$$Z = -\iiint_V \frac{\partial p}{\partial z} dV \dots\dots\dots (7)$$

$$K = -\iiint_V \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dV \dots\dots\dots (8)$$

여기에서 船體가 떠있다 함은 船體에 作用하는 靜水壓에 의해 發生하는 힘 Y, Z의 鉛直方向 成分과 船體의 重量이 平衡을 이룬 상태임을 의미하며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z \cos \phi + Y \sin \phi + W = 0 \dots\dots\dots (9)$$

여기서 W는 船體의 重量이고 水線下部의 船體容積 V와는 다음의 관계가 성립한다.

$$W = \rho g V \dots\dots\dots (10)$$

2. 復原아암의 計算法

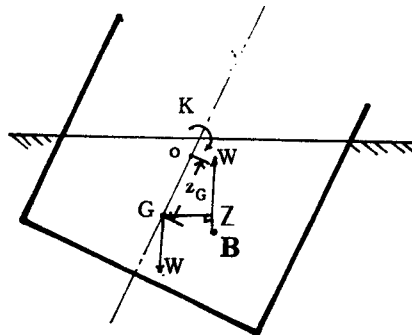


Fig. 2-3 Relation between heeling moment and righting moment.

Fig.2-3에서 復原모우먼트는 $W \cdot \overline{GZ}$ 로 표시될 수 있고 모우먼트의 작용점은 무게중심 G 이다. 그러나 靜水壓에 의한 橫傾斜 모우먼트 K 는 0점을 중심으로 하여 계산된 값이므로 무게중심 G 주위의 모우먼트에 관한 平衡條件으로부터 다음 관계가 成立한다.

$$W(\overline{GZ} - z_G \sin \phi) + K = 0 \quad (z_G \text{는 무게중심 } G \text{의 } Z \text{座標})$$

따라서 \overline{GZ} 는 다음과 같이 표시된다.

$$\overline{GZ} = -\frac{K}{W} + z_G \sin \phi \quad \dots\dots\dots (11)$$

箱子形 barge 船體는 等斷面을 갖는 船體이므로 船體길이 단위가인 2次元 船體로 간주할 수 있다.

1) 傾斜角의 分類

傾斜角 ϕ 가 0에서 $\frac{\pi}{2}$ 까지 변화하는 동안의 $\overline{GZ}(\phi)$ 의 변화를 調査하기 위해 水面과 船體形狀의 관계로부터 \overline{GZ} 의 性質이 변화하는 船體傾斜角을 다음과 같이 分割하였다.

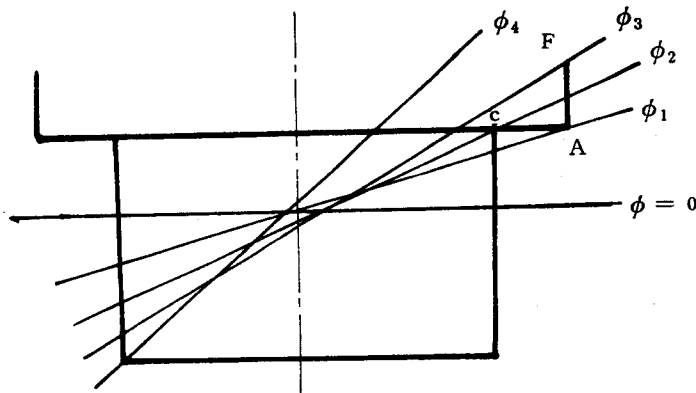


Fig.2-4 Division of heeling angle

ϕ_1 : bulwark 가 잠기기 시작하는 角度

ϕ_2 : bulwark 의 下面이 전부 잠기는 角度

ϕ_3 : 水面이 bulwark 를 넘는 角度

ϕ_4 : 船底가 空中에 露出하기 시작하는 角度

따라서 傾斜角은 다음의 5 段階로 分類할 수 있다.

第一段階 $0 \leq \phi < \phi_1$

第二段階 $\phi_1 \leq \phi < \phi_2$

第三段階 $\phi_2 \leq \phi < \phi_3$

第四段階 $\phi_3 \leq \phi < \phi_4$

第五段階 $\phi_4 \leq \phi < \frac{\pi}{2}$

2) 復原아압 (GZ) 의 計算法

(1) 第一段階 ($0 \leq \phi < \phi_1$)

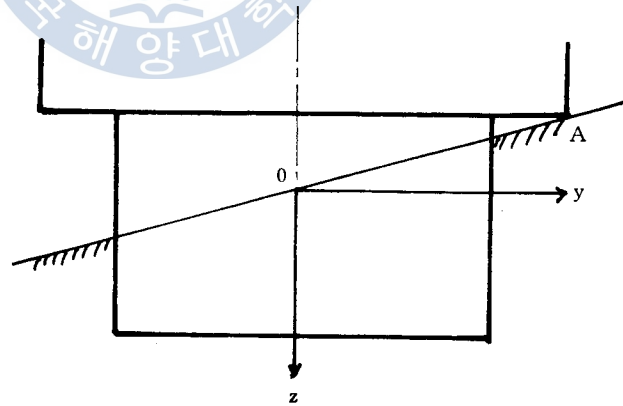


Fig.2-5 1st stage of heeling angles at $0 \leq \phi < \phi_1$

① ϕ_1 의 計算

Fig.2-5에서 bulwark의 끝단 A가 水面에 닿는 角이 ϕ_1 이 될 것이며 이 A점의 座標는

$$(y, z) = \left\{ \frac{1}{2} (B+b), -f \right\}$$

따라서 A점의 ζ 座標는 式(1)에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \zeta_A &= \zeta_0 + y \sin \phi + Z \cos \phi \\ &= \frac{1}{2} (B+b) \sin \phi - f \cos \phi \end{aligned}$$

이때 船體沈下는 일어나지 않을 것이므로 ζ_0 는 0이 된다. 따라서 傾斜角이 ϕ_1 일때 $\zeta_A = 0$ 이 되므로

$$\tan \phi_1 = 2f / (B+b) \dots\dots\dots (12)$$

이 되며 이로부터 ϕ_1 이 결정된다.

② K 모우먼트의 計算

水面의 z座標를 $z_w(y)$ 로 나타내면

$$z_w(y) = -y \tan \phi \dots\dots\dots (13)$$

따라서 傾斜모우먼트 K를 式(8)과 같이 나타내면

$$K = - \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} dy \int_{z_w}^d \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz \dots\dots\dots (14)$$

이때 靜水壓 P는 式(3)에서 $\zeta_0 = 0$ 인 경우이므로

$$P = \rho g (y \sin \phi + z \cos \phi) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\begin{aligned} \therefore K &= -\rho g \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} dy \int_{-\tan \phi}^d (y \cos \phi - z \sin \phi) dz \\ &= -\rho g \left\{ \frac{B^3}{12} \tan \phi (\cos \phi + \frac{1}{2} \tan \phi \sin \phi) - \frac{Bd^2}{2} \sin \phi \right\} \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

③ GZ의 計算

계산하고자 하는 箱子形船의 길이는 단위길이 (즉, $L = 1$)를 취하고 있으므로 이 배의 배수량 W 는

$$\begin{aligned} W &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} dy \int_0^d \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\phi=0} dz = \rho g \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} dy \int_0^d dz \\ \therefore W &= \rho g B d \text{ 이다.} \quad \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

따라서 式 (11) 에 의해

$$\begin{aligned} \overline{GZ} &= -\frac{K}{W} + z_G \sin \phi \\ &= \frac{1}{Bd} \left\{ \frac{B^3}{12} \tan \phi (\cos \phi + \frac{1}{2} \tan \phi \sin \phi) - \frac{Bd^2}{2} \sin \phi \right\} + z_G \sin \phi \\ &\quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

이때 幅이 B , 吃水 d 의 箱子形船의 경우 z_G 와 GM 과의 관계를 구해보면

$$\begin{aligned} z_G &= GM - OM = GM - (BM - BO) \\ &= GM - \left(BM - \frac{d}{2} \right) = \frac{d}{2} + GM - BM \\ \text{이때 } BM &= \frac{I}{V} = \frac{\frac{1}{12} \times B^3 \times 1}{Bd \times 1} = \frac{B^2}{12d} \end{aligned}$$

$$\therefore z_G = \frac{d}{2} - \frac{B^2}{12d} + GM \text{가 된다.} \dots\dots\dots (19)$$

(2) 第二段階 ($\phi_1 \leq \phi < \phi_2$)

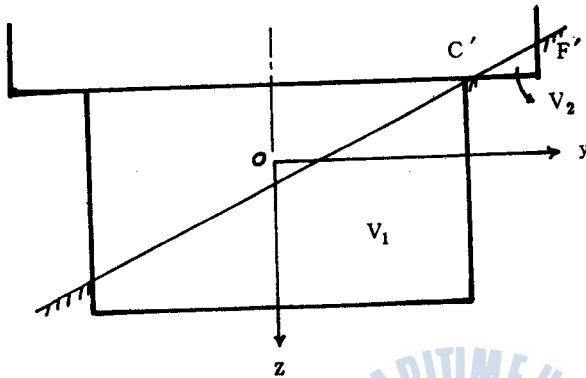


Fig.2-6 2nd stage of heeling angles at $\phi_1 \leq \phi < \phi_2$

① ϕ_2 및 ζ_0 의 計算

이 段階에 있어서 船體는 bulwark가 물에 잠김에 의해 얻어지는 附加的인 浮力에 의해 船體는 ζ_0 만큼 浮上한다. 이때 水面의 z座標 z_w 는 다음과 같 이 나타낼 수 있다.

$$z_w = \frac{-\zeta_0}{\cos \phi} - y \tan \phi \dots\dots\dots (20)$$

점 C'에서 $Z = -f$ 이므로 C'의 y座標는 式(20)으로부터

$$y_{C'} = \frac{f}{\tan \phi} - \frac{\zeta_0}{\sin \phi} \text{로 나타난다.} \dots\dots\dots (21)$$

또 점 F'에서 $y = \frac{1}{2}(B+b)$ 이므로 점 F'의 z座標는 式(20)으로부터

$$z_{F'} = -\frac{\zeta_0}{\cos \phi} - \frac{1}{2} (B+b) \tan \phi \text{ 가 된다. } \dots\dots\dots (22)$$

또한 Fig.2-6 과 같이 水線下의 體積을 V_1, V_2 라 하면 式(10)에서 $\rho g (V_1 + V_2) = W$ 이므로 이로부터 船體의 沈下量 ζ_0 가 計算된다.

$$V_1 = \frac{1}{2} B \left(d - \frac{B}{2} \tan \phi + \frac{\zeta_0}{\cos \phi} + d + \frac{B}{2} \tan \phi + \frac{\zeta_0}{\cos \phi} \right)$$

$$\therefore V_1 = Bd - \frac{B\zeta_0}{\cos \phi} \dots\dots\dots (23)$$

또한 bulwark 의 沈下體積 V_2 는

$$V_2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} (B+b) - \frac{f}{\tan \phi} + \frac{\zeta_0}{\sin \phi} \right\} \left\{ \frac{1}{2} (B+b) \tan \phi + \frac{\zeta_0}{\cos \phi} - f \right\}$$

$$\dots\dots\dots (24)$$

式(17), (23), (24) 에 의해서

$$Bd + \frac{B\zeta_0}{\cos \phi} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} (B+b) - \frac{f}{\tan \phi} + \frac{\zeta_0}{\sin \phi} \right\} \left\{ \frac{1}{2} (B+b) \tan \phi + \frac{\zeta_0}{\cos \phi} - f \right\} = Bd$$

이 式을 ζ_0 에 대해 정리하면 다음과 같은 二次方程式을 얻는다.

$$4\zeta_0^2 + 2 \{ 2(3B+b) \sin \phi - 4f \cos \phi \} \zeta_0 + \{ (B+b) \sin \phi - 2f \cos \phi \}^2 = 0$$

$$\dots\dots\dots (25)$$

式(25)의 方程式을 풀어서 ζ_0 를 구하면

$$\zeta_0 = f \cos \phi - \frac{1}{2} (3B+b) \sin \phi \pm \sqrt{\{(2B+b) \sin \phi - 2f \cos \phi\} B \sin \phi}$$

그런데 $\phi = \phi_1$ 에서 $\zeta_0 = 0$ 이어야 하므로 이 條件을 만족하는 ζ_0 는

$$\zeta_0 = f \cos \phi - \frac{1}{2} (3B+b) \sin \phi + \sqrt{\{(2B+b) \sin \phi - 2f \cos \phi\} B \sin \phi}$$

..... (26)

이다.

또한 $y_c|_{\phi=\phi_2} = \frac{B}{2}$ 이므로 이로부터 ϕ_2 를 구하면

式(21)로부터

$$\frac{f}{\tan \phi_2} - \frac{1}{\sin \phi_2} \left[f \cos \phi_2 - \frac{1}{2} (3B+b) \sin \phi_2 + \sqrt{\{(2B+b) \sin \phi_2 - 2f \cos \phi_2\} B \sin \phi_2} \right] = \frac{B}{2} \dots\dots (27)$$

에 의해 이를 만족하는 ϕ 값이 된다.

② K 모우먼트의 計算

이 傾斜區間에 있어서의 K모우먼트는 水線下部體積 V_1 과 V_2 에 의해 形成되므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = -\rho g \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} dy \int_{z_w}^d \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz - \rho g \int_{y_c'}^{\frac{1}{2}(B+b)} dy \int_{z_w}^{-f} \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz$$

$$\begin{aligned}
 &= -\rho g \left[\frac{B^3}{12} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \sin \phi + \frac{B \sin \phi}{2} \left(\frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} - d^2 \right) \right] \\
 &\quad - \rho g \left[\frac{\sin \phi}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \left\{ \left(\frac{B+b}{2} \right)^3 - y_c'^3 \right\} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \left\{ \zeta_0 (1 + \tan^2 \phi) - f \cos \phi \right\} \left\{ \left(\frac{B+b}{2} \right)^2 - y_c'^2 \right\} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \sin \phi \left(\frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} - f^2 \right) \left(\frac{B+b}{2} - y_c' \right) \right] \dots\dots\dots (28)
 \end{aligned}$$

여기에서 y_c' , ζ_0 는 식 (21), (26) 에 의해 주어진다.

③ \overline{GZ} 의 計算

式 (11) 에 의해

$$\begin{aligned}
 \overline{GZ} &= -\frac{K}{W} + z_G \sin \phi \text{ 가 되며 式 (17), (19), (28) 에 따라 計算하여 정리하면} \\
 \overline{GZ} &= [\overline{GZ}]_0 + \frac{1}{Bd} \left[\frac{B\zeta_0^2 \sin \phi}{2 \cos^2 \phi} + \frac{\sin \phi}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \left\{ \left(\frac{B+b}{2} \right)^3 - y_c'^3 \right\} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \left\{ \zeta_0 (1 + \tan^2 \phi) - f \cos \phi \right\} \left\{ \left(\frac{B+b}{2} \right)^2 - y_c'^2 \right\} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \sin \phi \left(\frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} - f^2 \right) \times \left(\frac{B+b}{2} - y_c' \right) \right] \dots\dots\dots (29)
 \end{aligned}$$

윗 식에서

$$[\overline{GZ}]_0 = \frac{1}{Bd} \left\{ \frac{B^3}{12} \tan \phi \left(\cos \phi + \frac{1}{2} \tan \phi \sin \phi \right) - \frac{Bd^2}{2} \sin \phi \right\} + z_G \sin \phi \text{ 이며}$$

式 (18) 의 \overline{GZ} 값이다.

이것은 bulwark가 設置되어 있지 않고 幅 B , 吃水 d 만으로 충분한 free-board를 갖는 단순한 矩形斷面의 箱子形船體에 대한 \overline{GZ} 값을 의미하며 式(26)의 나머지 항들은 여기에 附加하여 bulwark의 영향으로 추가되는 \overline{GZ} 의 增分이라 할 수 있다.

(3) 第三段階 ($\phi_2 \leq \phi < \phi_3$)

이 段階에서는 여전히 bulwark로 인한 餘분의 浮力에 의해서 船體는 浮上하고 따라서 $\zeta_0 < 0$ 이 된다. 또한 이 段階에서는 左舷의 船底가 水面위로 露出되지 않는 것으로 가정한다.

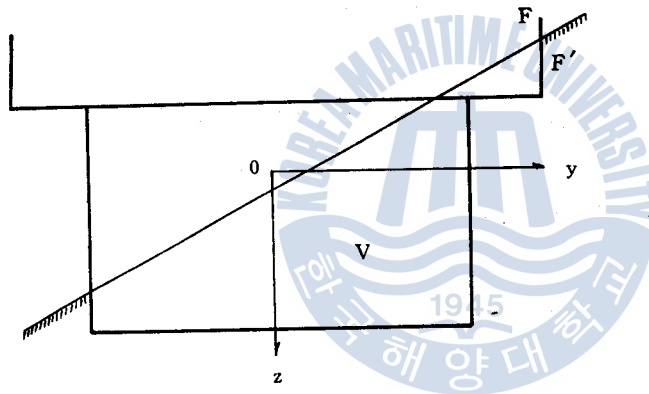


Fig.2-7 3rd stage of heeling angles at $\phi_2 \leq \phi < \phi_3$

① ζ_0 및 ϕ_3 의 計算

앞에서의 경우와 같이 이 段階內의 水面의 座標 z_w 는

$$z_w = \frac{-\zeta_0}{\cos \phi} - y \tan \phi$$

bulwark와 水面이 만나는 점 F' 의 y 座標는 $y = \frac{1}{2}(B+b)$ 이므로 점 F'

의 z 座標 $z_{F'}$ 는

$$z_{F'} = \frac{-\zeta_0}{\cos \phi} - \frac{1}{2} (B+b) \tan \phi \quad \dots\dots\dots (30)$$

式 (10) 의 $\rho g V = W$ 로부터 船體沈下量 ζ_0 를 구하면

$$\left(d + \frac{\zeta_0}{\cos \phi} + \frac{b}{4} \tan \phi \right) \left(B + \frac{b}{2} \right) - \frac{b}{2} (d+f) = Bd$$

이를 ζ_0 에 관해 정리하면

$$\zeta_0 = \cos \phi \left(\frac{bf}{2B+b} - \frac{b}{4} \tan \phi \right) \quad \dots\dots\dots (31)$$

또 $z_{F'} = d - D$ 에서 式 (30) 에 의해 ϕ_3 를 얻고자 하면

$$d - D = \frac{-\zeta_0}{\cos \phi_3} - \frac{1}{2} (B+b) \tan \phi_3$$

$$\therefore \tan \phi_3 = \frac{4 \{ (D-d) (2B+b) - bf \}}{(2B+b)^2} \quad \dots\dots\dots (32)$$

② K 모우먼트의 計算

이 區間內에서의 K 모우먼트는 Fig.2-7 에 보이는 積分區間으로부터

$$K = -\rho g \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} dy \int_{z_w}^d \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz - \rho g \int_{\frac{B}{2}}^{\frac{1}{2}(B+b)} dy \int_{z_w}^{-f} \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz$$

$$= -\rho g \left[\frac{B^3}{12} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \sin \phi + \frac{B \sin \phi}{2} \left(\frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} - d^2 \right) \right]$$

$$- \rho g \left[\frac{1}{24} \left\{ (B+b)^3 - B^3 \right\} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \sin \phi \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{8} \left\{ (B+b)^2 - B^2 \right\} \left\{ \zeta_0 (1 + \tan^2 \phi) - f \cos \phi \right\} \\
& + \frac{\sin \phi}{4} \left(\frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} - f^2 \right) b \left. \right] \dots \dots \dots (33)
\end{aligned}$$

③ \overline{GZ} 의 計算

式(11), (19), (33)에 따라 이 區間內에서의 \overline{GZ} 를 計算하여 정리하면

$$\begin{aligned}
\overline{GZ} &= [\overline{GZ}]_0 + \frac{1}{Bd} \left[\frac{B \zeta_0^2 \sin \phi}{2 \cos^2 \phi} + \frac{1}{24} \left\{ (B+b)^3 - B^3 \right\} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \sin \phi \right. \\
& + \frac{1}{8} \left\{ (B+b)^2 - B^2 \right\} \left\{ \zeta_0 (1 + \tan^2 \phi) - f \cos \phi \right\} + \\
& \left. + \frac{\sin \phi}{4} \left(\frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} - f^2 \right) b \right] \dots \dots \dots (34)
\end{aligned}$$

여기서 $[\overline{GZ}]_0$ 는 앞에서와 같이 式(18)의 \overline{GZ} 값으로 bulwark가 없는 경우의 단순한 矩形斷面の 箱子形船體에 대한 \overline{GZ} 값이며 式(34)의 나머지 항들은 bulwark의 영향에 의해 增加되는 \overline{GZ} 값을 나타낸다.

(4) 第四段階 ($\phi_3 \leq \phi < \phi_4$)

이 段階에 있어서는 bulwark가 물에 잠기게 되므로 浮力을 형성시키지 못하며 Deck가 물에 잠기기 때문에 船體는 沈下하게 되어 $\zeta_0 > 0$ 이 된다.

또한 이 段階內에서는 左舷 船底가 水面위로 露出되지 않는 것으로 한다.

① ζ_0 및 ϕ_4 의 計算

이 段階內에서 水面의 z座標 z_w 는 앞에서와 같이

$$z_w = -\frac{\zeta_0}{\cos \phi} - y \tan \phi$$

갑판과 水線이 만나는 c' 점의 z 座標는 $-f$ 이고 y 座標는 위의 식의 z_w 에 $-f$ 를 代入하여 整理하면

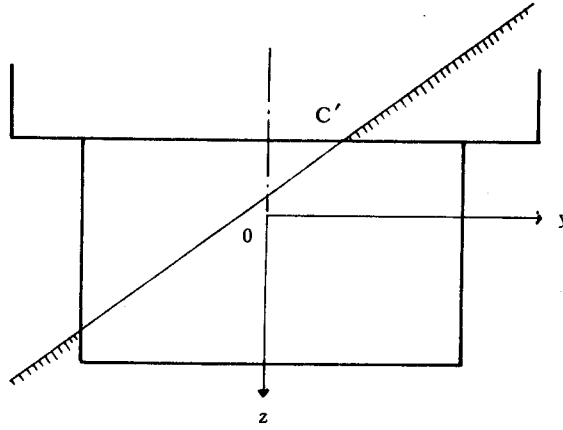


Fig.2-8 4th stage of heeling angles at $\phi_3 \leq \phi < \phi_4$

$$y_{c'} = \frac{f}{\tan \phi} - \frac{\zeta_0}{\sin \phi}$$

式(10)에서 $\rho g V = W$ 이므로 이 4 관계를 이용하여 船體沈下量 ζ_0 를 구하면

$$\frac{1}{2} \left(f + 2d - \frac{B}{2} \tan \phi + \frac{\zeta_0}{\cos \phi} \right) \left(\frac{B}{2} + y_{c'} \right) + \left(\frac{B}{2} - y_{c'} \right) (f + d) = Bd$$

이를 ζ_0 에 관해 整理하면 다음과 같이 ζ_0 에 관한 二次方程式을 얻는다.

$$2 \tan \phi \zeta_0^2 - 2 \sin \phi (B \tan \phi + 2f) \zeta_0 + \frac{\tan \phi}{2} (2f \cos \phi - B \sin \phi)^2 = 0$$

이 식을 ζ_0 에 관해 풀면

$$\zeta_0 = \frac{\sin \phi (B \tan \phi + 2f) \pm 2 \sin \phi \sqrt{2f B \tan \phi}}{2 \tan \phi}$$

이때 $\zeta_0 = 0$ 인 條件이 만족되어야 한다. 따라서 이 條件에 맞는 ζ_0 는

$$\zeta_0 = \frac{\sin \phi \{ (B \tan \phi + 2f) - 2 \sqrt{2 f B \tan \phi} \}}{2 \tan \phi}$$

$$\therefore \zeta_0 = \frac{\cos \phi}{2} \{ (B \tan \phi + 2f) - 2 \sqrt{2 f B \tan \phi} \} \dots\dots\dots (35)$$

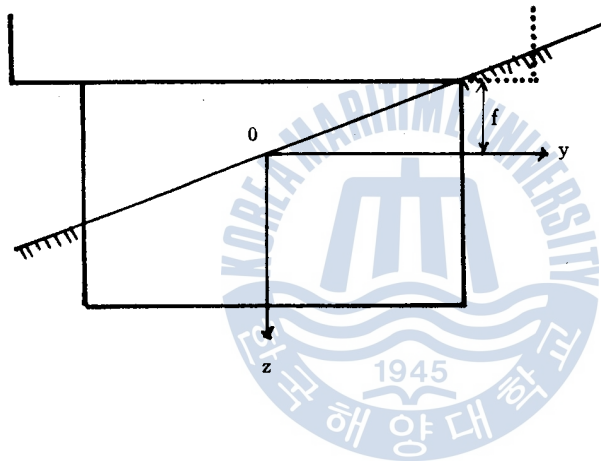


Fig.2-9 Deck flooding in case of no bulwarks.

ϕ_4 는 左舷 吃水가 d 일때의 傾斜角이므로 이점에서 $z_w = d, y = -\frac{B}{2}$ 가 된다.

$$d = -\frac{\zeta_0}{\cos \phi_4} + \frac{B}{2} \tan \phi_4$$

따라서 $\tan \phi_4 = \frac{(d+f)^2}{2fB} \dots\dots\dots (36)$ 에서 ϕ_4 가 구해진다.

② K 모우먼트의 計算

이 區間內에서의 K 모우먼트는 Fig.2-8에서 水面에 잠긴 부분을 積分區間으로 하여

$$\begin{aligned}
 K &= -\rho g \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} dy \int_{z_w}^d \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz - \rho g \int_{\frac{B}{2}}^{y_c'} dy \int_{z_w}^{-f} \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz \\
 &= -\rho g \left[\frac{B^3}{12} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \sin \phi + \frac{B \sin \phi}{2} \left(\frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} - d^2 \right) \right] \\
 &\quad + \rho g \left[\frac{\sin \phi}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^3 - y_c'^3 \right\} \right. \\
 &\quad + \frac{1}{2} \left\{ \zeta_0 (1 + \tan^2 \phi) - f \cos \phi \right\} \left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^2 - y_c'^2 \right\} \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \sin \phi \left(\frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} - f^2 \right) \left(\frac{B}{2} - y_c' \right) \right] \dots \dots \dots (37)
 \end{aligned}$$

③ \overline{GZ} 의 計算

式(11), (19), (37)에 따라 이 傾斜區間內에서의 \overline{GZ} 를 計算하여 정리하면

$$\begin{aligned}
 \overline{GZ} &= [\overline{GZ}]_0 + \frac{1}{Bd} \left[\frac{B \zeta_0^2 \sin \phi}{2 \cos^2 \phi} - \frac{\sin \phi}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^3 - y_c'^3 \right\} \right. \\
 &\quad - \frac{1}{2} \left\{ \zeta_0 (1 + \tan^2 \phi) - f \cos \phi \right\} \left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^2 - y_c'^2 \right\} - \frac{\sin \phi}{2} \\
 &\quad \left. \left(\frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} - f^2 \right) \left(\frac{B}{2} - y_c' \right) \right\}]
 \end{aligned}$$

(5) 第五段階 ($\phi_4 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$)

이 段階에서는 傾斜反對舷側船底部가 水面위로 노출된 이후부터의 傾斜角에 대하여 考察한다.

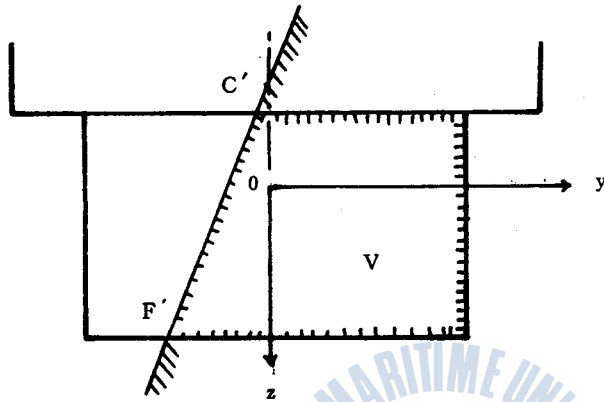


Fig.2-10 5th stage of heeling angles at $\phi_4 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$

① ζ_0 의 計算

水面의 z座標를 나타내면

$$z_w = \frac{-\zeta_0}{\cos \phi} - y \tan \phi$$

船底와 水面의 交點 F'에서 z座標는 $z_w = d$ 이므로 y座標

$$y_{F'} = \frac{-\zeta_0}{\sin \phi} - \frac{d}{\tan \phi}$$

甲板이 水面과 만나는 점 C'에서의 z座標는 $z_w = -f$ 이므로 y座標는

$$y_{C'} = \frac{f}{\tan \phi} - \frac{\zeta_0}{\sin \phi}$$

式(10)의 $\rho g V = W$ 로부터 船體沈下量 ζ_0 를 구하면

$$\frac{1}{2} \left(B + \frac{2\zeta_0}{\sin \phi} + \frac{d}{\tan \phi} - \frac{f}{\tan \phi} \right) (f + d) = Bd$$

ζ_0 에 대해서 정리하면

$$\zeta_0 = (d - f) \left\{ \frac{B \sin \phi}{2(d + f)} - \frac{1}{2} \cos \phi \right\} \dots\dots\dots (38)$$

② K 모우먼트의 計算

K 모우먼트는 위에서 구한 C', F' 의 座標로부터 水面下에 잠긴 體積의 斷面을 積分區間으로 하여 구하면

$$\begin{aligned} K &= -\rho g \int_{y_F'}^{y_C'} dy \int_{z_w}^d \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz - \rho g \int_{y_C'}^{\frac{B}{2}} dy \int_{-f}^d \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz \\ &= \rho g \left[\frac{1}{3} (y_C'^3 - y_F'^3) \left(\sin \phi + \frac{1}{2} \sin \phi \tan^2 \phi \right) + \frac{1}{2} (y_C'^2 - y_F'^2) \right. \\ &\quad \left. (d \cos \phi + \zeta_0 + \zeta_0 \tan^2 \phi) - \frac{1}{2} \sin \phi (y_C' - y_F') \left(d^2 - \frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} \right) \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} \rho g (d + f) \left[\left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^2 - y_C'^2 \right\} \cos \phi - \left\{ \left(\frac{B}{2} \right) - y_C' \right\} (d - f) \sin \phi \right] \\ &\dots\dots\dots (39) \end{aligned}$$

③ \overline{GZ} 의 計算

式(11), (19), (39)에 따라 이 傾斜區間內에서의 \overline{GZ} 를 계산하여 정리하면

$$\overline{GZ} = \frac{1}{Bd} \left[\frac{1}{3} (y_C'^3 - y_F'^3) \left(\sin \phi + \frac{1}{2} \sin \phi \tan^2 \phi \right) + \frac{1}{2} (y_C'^2 - y_F'^2) \right]$$

$$\begin{aligned}
& (d \cos \phi + \zeta_0 + \zeta_0 \tan^2 \phi) \\
& - \frac{1}{2} (y_{c'} + y_{f'}) \sin \phi (d^2 - \zeta_0^2 / \cos^2 \phi) \\
& + \frac{1}{2} (d + f) \left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^2 - y_{c'}^2 \right\} \cos \phi \\
& - \frac{1}{2} (d + f) \left\{ \left(\frac{B}{2} \right) - y_{c'} \right\} \sin \phi (d - f) \Big] + z_G \sin \phi
\end{aligned}$$

以上과 같이 水密 bulwark 를 갖는 箱子形船이 계속적으로 傾斜하는 동안을 \overline{GZ} 의 變化要因이 發生하는 구간별로 나누어 區間別 傾斜角, 각 區間內의 船體 沈下量 ζ_0 및 \overline{GZ} 를 micro computer 를 사용하여 計算하였다.



Ⅲ. 實 驗

船舶의 復原性能 및 顛覆현상의 설명은 純粹理論的 方法만으로는 不完全하므로 實驗的 事實의 考察이 必要하다.”

水密 bulwark 를 갖는 箱子形船에서 bulwark 가 復原性能에 미치는 영향을 앞서의 理論式으로 計算하고 이것이 實際와 합치하는가를 확인하기 위하여 다음과 같이 實驗을 수행하였다.

1. 實驗裝置 및 模型船의 明細

1) 實驗裝置

實驗裝置는 英國의 Armfield 社가 製作한 Large Angle Ship Stability Dynamometer 이며 Fig.3-1 에 概略的인 外樣을 보였다.

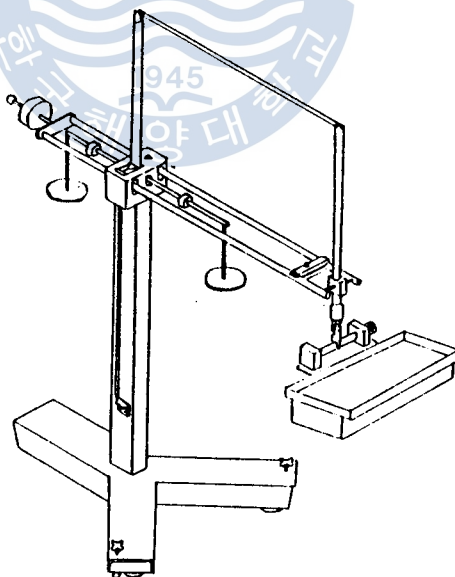


Fig.3-1 Arrangement of the model ship and large angle ship stability dynamometer.

이 裝置는 船體를 물에 띄워 強制的으로 傾斜시켰을 때 주어진 傾斜角에서 이 船體에 作用하는 復原모우먼트를 測定하도록 되어 있으며⁸⁾ 이런 種類의 實驗裝置는 그 精度가 매우 높은 것으로 확인되고 있다.⁹⁾

2) 模型船의 形狀

模型船의 形狀은 Fig. 3-2에 보이고 있으며 그 構造는 ballast의 調整으로 重心G의 위치를 調節하기 위해 twin deck 構造로 하고 4개의 隔壁을 두었으며 移動여부를 감시하기 위하여 透明 아크릴 樹脂를 模型船의 材料로 사용하였다.

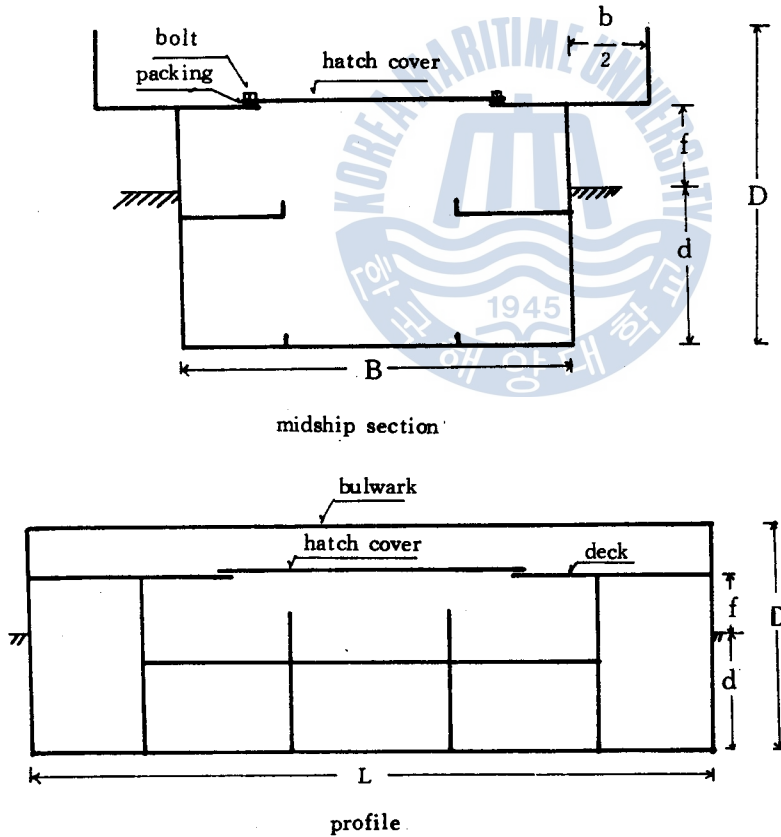


Fig.3-2 Geometry of model ship

3) 模型船의 主要目

模型船의 主要目은 表 3-1 과 같다.

Table.3-1 Principal dimensions of models.

| items | model No 1 | model No 2 |
|------------------------|------------|------------|
| Length(L) | 1.00 m | 1.00 m |
| breadth(B) | 0.25 m | 0.25 m |
| breadth of bulwark (b) | 0.10 m | 0.04 m |
| height to bulwark (D) | 0.20 m | 0.20 m |
| mean draft (d) | 0.10425 m | 0.106 m |
| freeboard(f) | 0.04575 m | 0.044 m |
| GM | 0.03 B | 0.028 B |
| hull weight | 15.0 kg | 14.76 kg |
| ballast weight | 11.06 kg | 10.08 kg |
| displacement (W) | 26.06 kg | 24.84 kg |
| D/B | 0.8 | 0.8 |
| b/B | 0.4 | 0.16 |
| d/B | 0.417 | 0.424 |
| f/d | 0.439 | 0.415 |

2. 實驗方法

다음과 같은 順序로 模型實驗을 修行하였다.

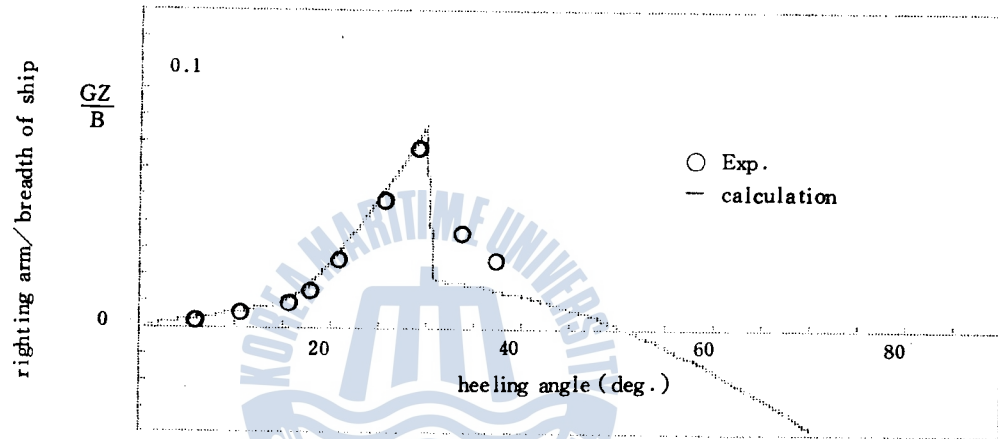
- ① 模型船內에 ballast weight 를 채워 吃水, Trim, heeling 을 조정한다.
- ② 吃水 및 저울에 의해 模型船의 重量을 구한다.
- ③ 傾斜試驗을 하여 GM을 산출한다.
- ④ 模型船을 實驗裝置에 부착, 고정하여 傾斜角을 변화시키면서 復原 모우먼트를 측정한다.
- ⑤ 復原 모우먼트로부터 復原 아암 (\overline{GZ}) 을 계산한다.



IV. 理論計算과 實驗結果의 比較檢討

模型船 1 과 模型船 2 의 主要目을 資料로 하여 復原아암 (\overline{GZ}) 을 理論計算으로 구하여 靜的復原力 曲線을 그리고 여기에 實驗을 통하여 얻은 復原아암을 기점하여 Fig.4-1 에 나타냈다.

여기서 GZ 는 그 크기를 船幅으로 나누어서 無次元化하였다.



model 1

2. 實驗方法

다음과 같은 順序로 模型實驗을 修行하였다.

- ① 模型船內에 ballast weight 를 채워 吃水, Trim, heeling 을 조정한다.
- ② 吃水 및 저울에 의해 模型船의 重量을 구한다.
- ③ 傾斜試驗을 하여 GM을 산출한다.
- ④ 模型船을 實驗裝置에 부착, 고정하여 傾斜角을 변화시키면서 復原 모우먼트를 측정한다.
- ⑤ 復原 모우먼트로부터 復原 아암 (\overline{GZ}) 을 계산한다.



IV. 理論計算과 實驗結果의 比較檢討

模型船 1 과 模型船 2 의 主要目을 資料로 하여 復原아암 (\overline{GZ}) 을 理論計算으로 구하여 靜的復原力 曲線을 그리고 여기에 實驗을 통하여 얻은 復原아암을 기점하여 Fig.4-1 에 나타냈다.

여기서 GZ 는 그 크기를 船幅으로 나누어서 無次元化하였다.

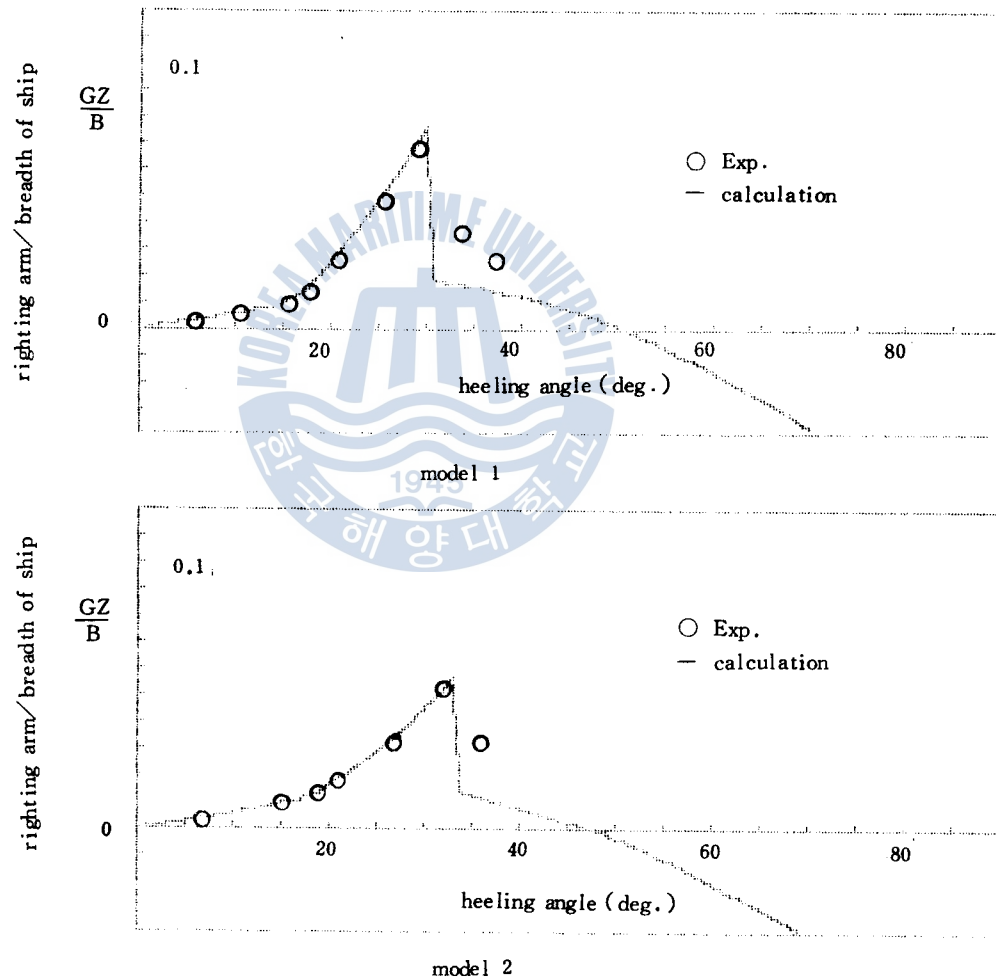


Fig.4-1 Stability curve of model ships.

Fig.4-1의 內容을 檢討하면

① 理論計算置와 實驗置가 거의 일치하다가 甲板沈水角 이후 差를 보이는 것은, 理論計算에서는 bulwark의 두께가 無視되었으나 實驗에 있어서 模型船은 bulwark가 비교적 큰 두께를 갖게 되므로 沈水時 復原모우멘트를 형성하기 때문이다.

② bulwark의 효과는 bulwark가 없는 狀態의 復原아암에 bulwark에 의해 얻어지는 復原아암이 더해지는 것으로 나타난다.

③ bulwark의 효과는 bulwark가 沈水될 때부터 시작하여 甲板沈水 直前까지이며 이 사이에서 \overline{GZ} 는 急增하여 甲板沈水 直前에서 最大의 復原아암(\overline{GZ}_{max})을 보인다.

④ 模型船 1과 2의 比較에서 보이듯이 bulwark의 幅이 클수록 \overline{GZ}_{max} 가 커지나 甲板沈水角이 작아져 bulwark의 영향은 좁은 範圍에서 나타난다.

實驗에서 理論計算이 잘 맞음을 確認하였으므로 模型船의 形狀에 변화를 주면서 復原力의 변화를 計算, 檢討하여 보았다.

Fig.4-2는 bulwark 幅이 復原力에 미치는 영향을 나타낸 것으로 그 내용은

① 甲板沈水角까지의 動復原力은 bulwark 幅의 크기에 관계없이 대체로 같은 값을 갖는다.

② bulwark의 幅에 대한 船幅의 比가 클수록 最大復原아암(\overline{GZ}_{max})은 커지고 最大復原아암이 일어나는 傾斜角은 작아진다.

Fig.4-3은 bulwark 높이의 영향을 나타냈다. 당연한 결과이겠지만 bulwark의 높이가 높을수록 復原力에 미치는 效果는 큰 것으로 나타났다.

Fig.4-4와 Fig.4-5는 吃水와 乾舷이 復原力에 미치는 영향을 나타냈고

Fig.4-6은 bulwark의 幅과 높이의 變化에 따른 甲板沈水角의 變化를 나타냈다.

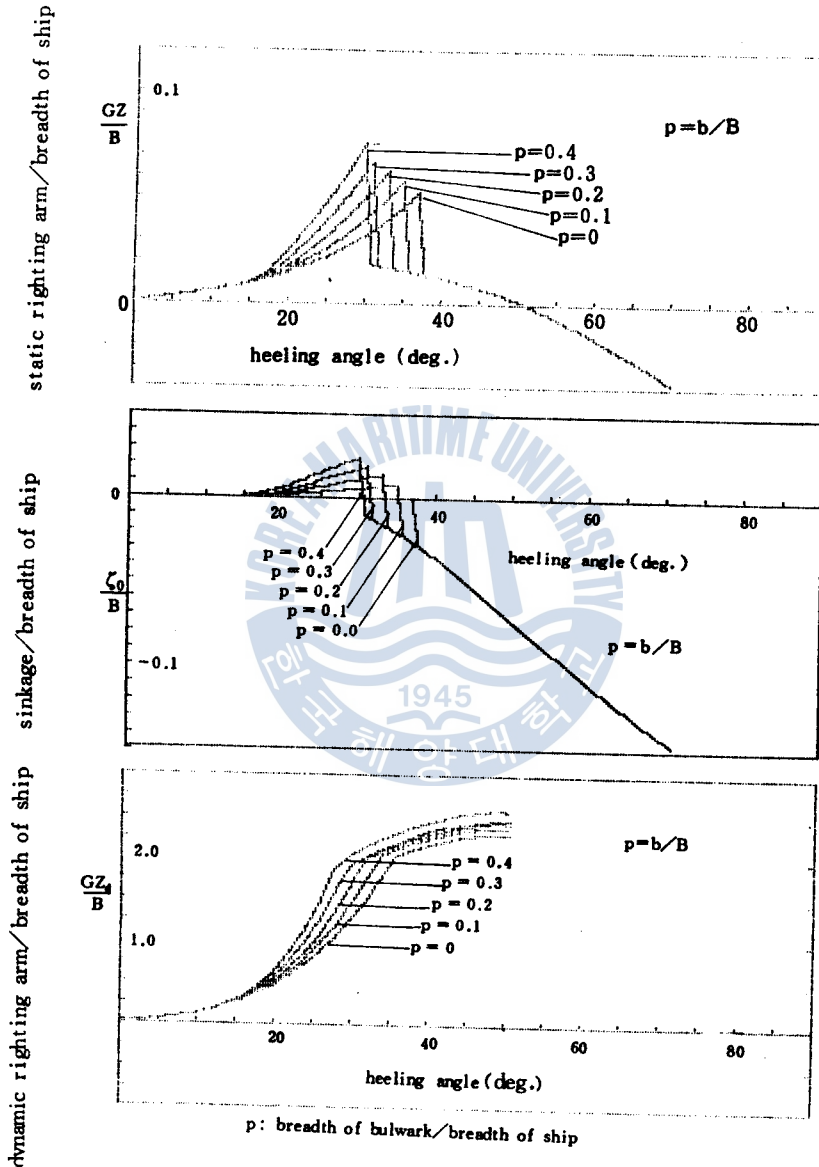


Fig.4-2 Effect of bulwark breadth on stability.

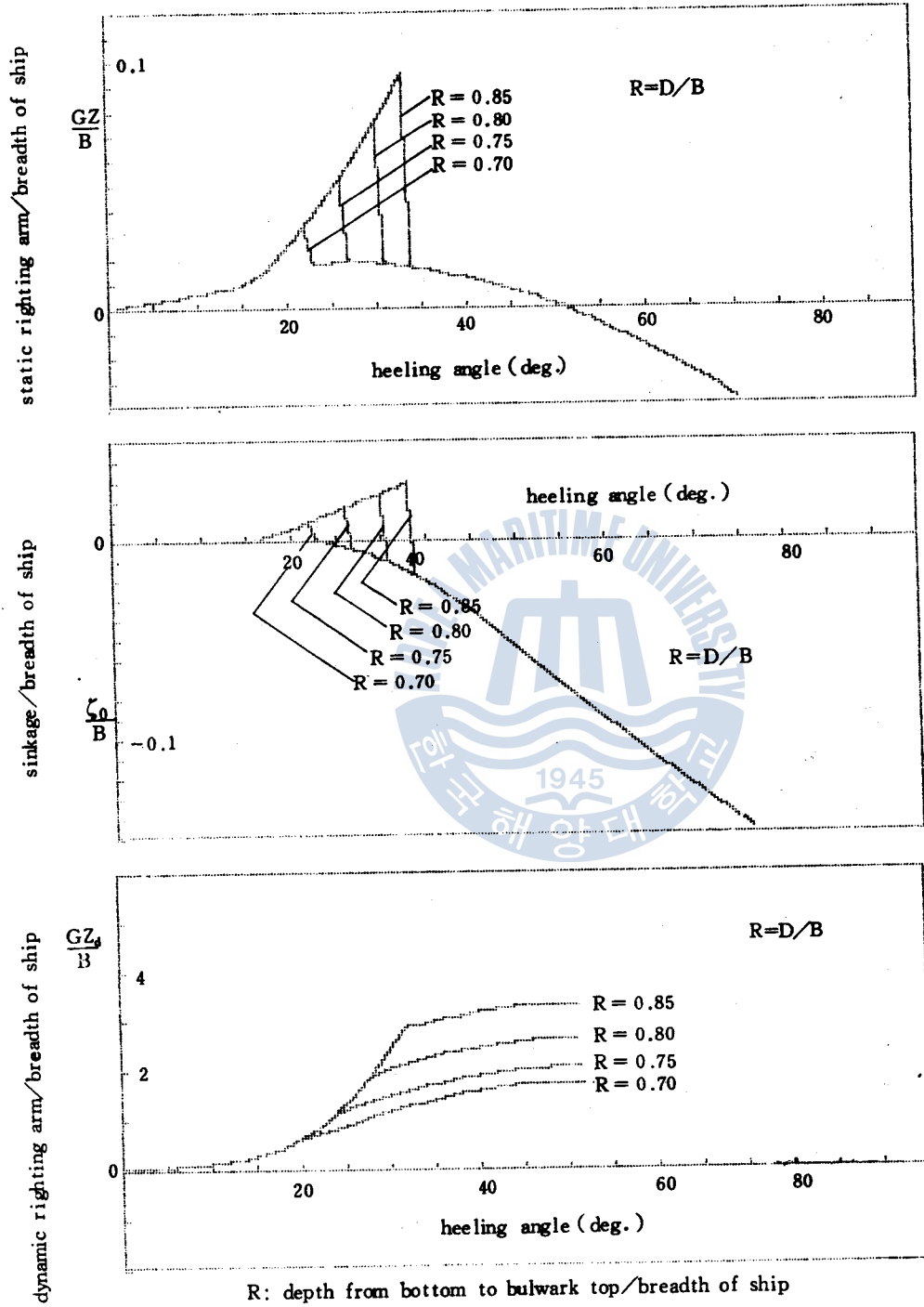


Fig.4-3 Effect of bulwark height on stability.

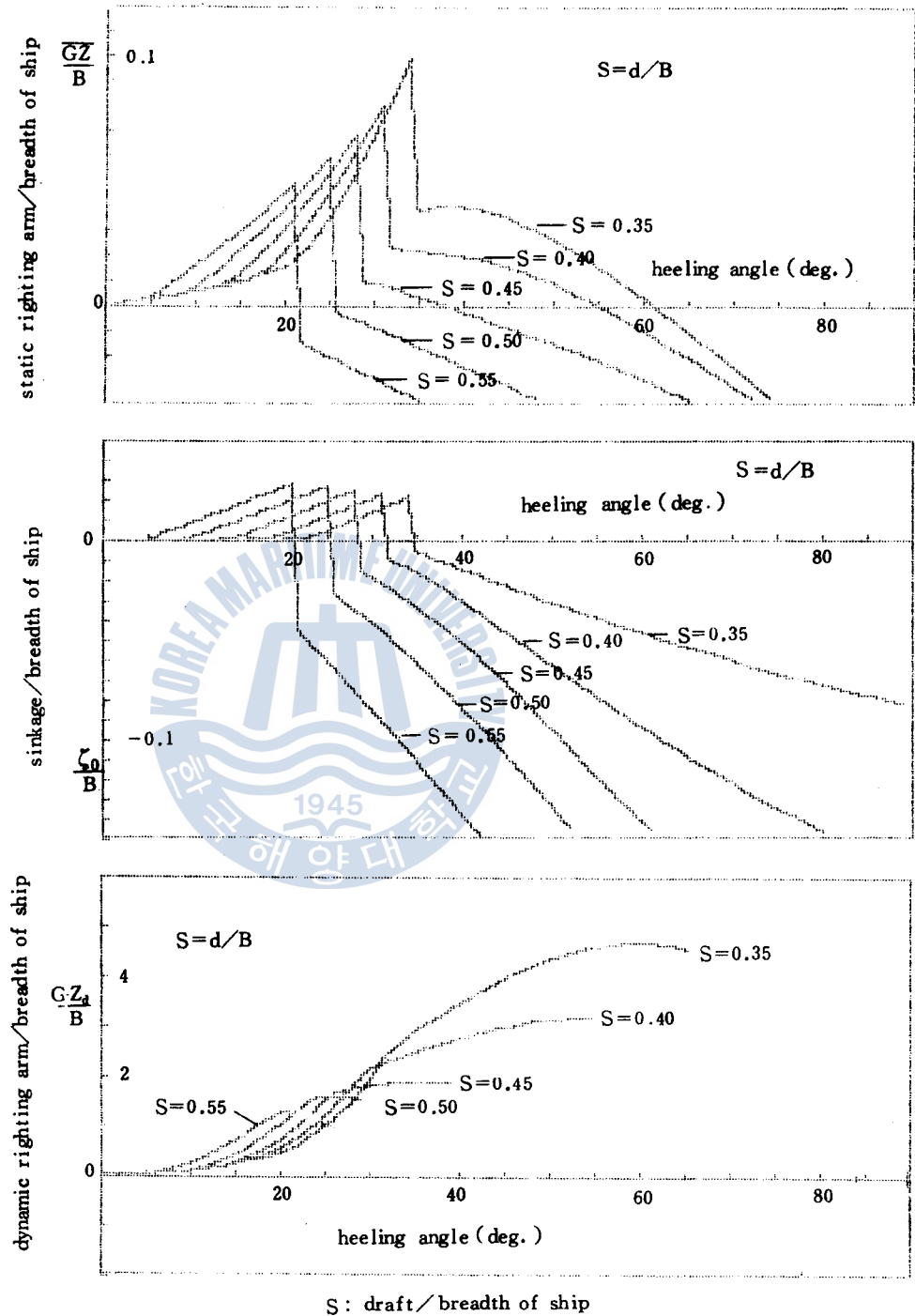
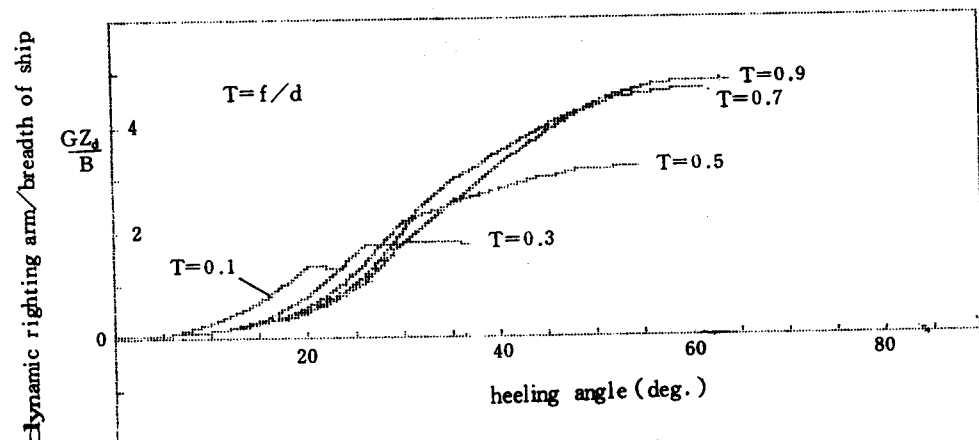
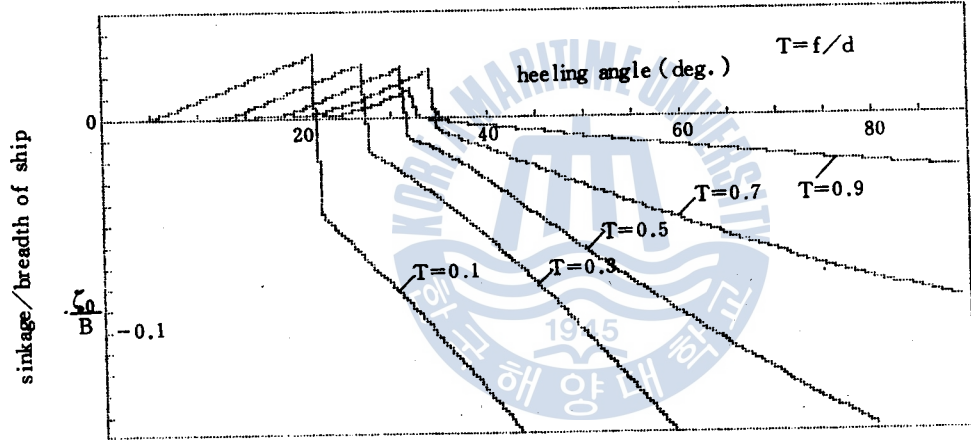
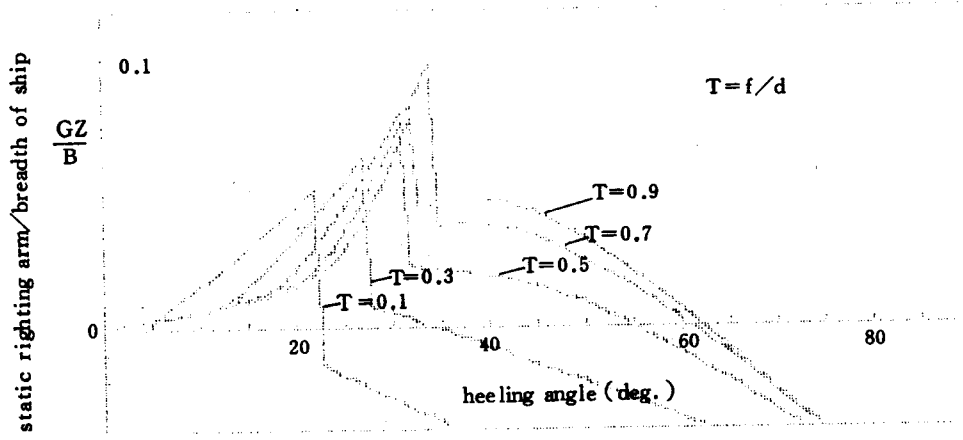


Fig.4-4 Effect of draft on stability.



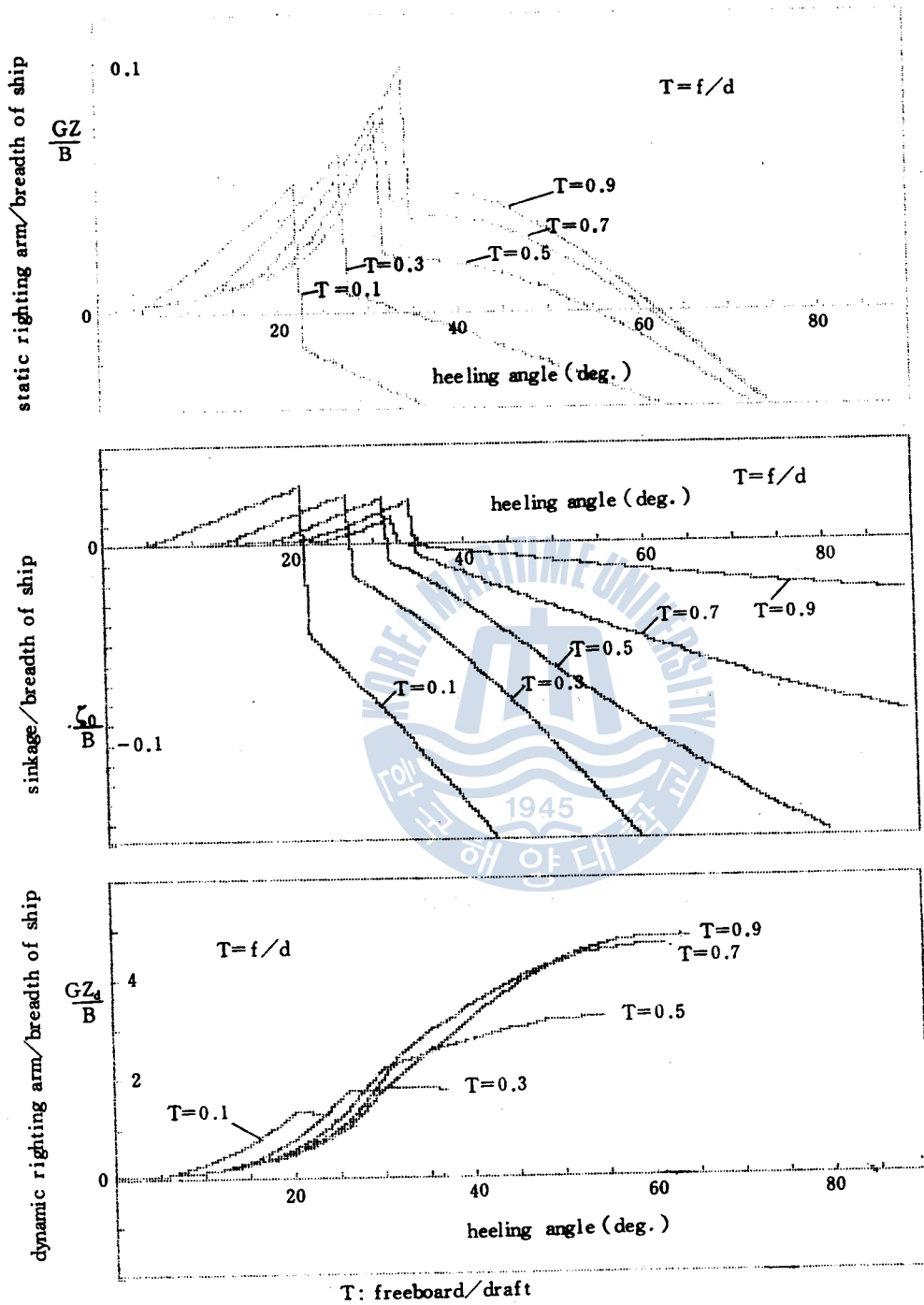


Fig.4-5 Effect of freeboard on stability.

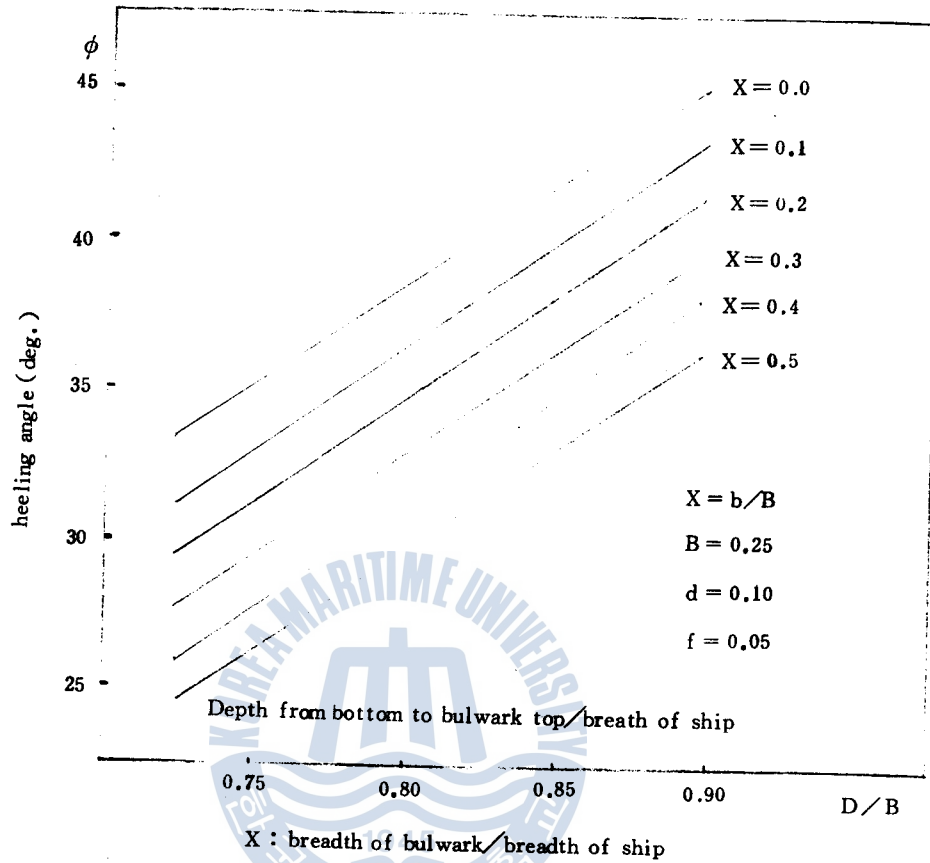


Fig. 4-6 Deck flooding angle

V. 結 論

箱子形 浮體의 上甲板 兩舷側에 설치된 水密 bulwark 가 復原性能에 미치는 영향을 流體靜力學的 理論計算 및 實驗을 통하여 檢討한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 復原性能의 評價方法으로서 Gauss 정리를 이용하여 靜水壓의 體積積分에 의해 復原力을 計算하는 流體靜力學的 方法이 精度가 높고 有用함을 확인하였다.
- 2) 水密 bulwark 를 設置하므로써 中程度의 傾斜角 (약 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$)에서 復原性能이 크게 향상됨을 확인하였다.
- 3) bulwark 幅에 대한 船幅의 比(P)가 클수록 最大復原아암은 커지고 最大復原아암이 일어나는 傾斜角은 작아진다.

以上과 같이 靜水中에서 箱子形船에 設置된 水密 bulwark 가 復原性能에 미치는 效果에 대하여 몇가지 結論을 얻을 수 있었으며 海洋構造物 또는 作業船에서 그 用途 및 주어진 特性에 따라 이를 適切히 活用하면 安定性能의 改善에 有用할 것으로 思料된다.

또한 bulwark 가 設置된 箱子形船의 耐波浪性에 대해서는 앞으로 研究해야 할 課題로 생각된다.

參 考 文 獻

- 1), 3) 小岩健：箱型船の 安定性に ついて，作業船，第99號（1975年）。
- 2) 石川鳥播磨重工業株式會社 技術研究所：船舶試驗水槽 15年の歩み，p.173，
（1982年）。
- 4) 中川憲治：工科の ための一般力學，森北出版株式會社，p.114。
- 5) 元良成三：船體と 海洋構造物の 運動學，成山堂，p.2，（1982年）。
- 6) Erwin Kreisig：Advanced engineering mathematics, John Wiley & Sons, p.441，
（1983年）。
- 7) 高石敬史：船舶の 復原性 研究の 現状と 課題，日本造船學會誌，第594號，
（1978年）。
- 8) R.L.Townsin：Instruction Manual for NA8 Large Angle Ship Stability
Dynamometer, Armfield Co.,（1983年）。
- 9) IR.R.F Scheltema：Buoyancy and Stability of Ship, Netherlands, p.114。