

상자형부유체의 횡복원성에 미치는 Bulwark의 영향

윤 명 오* · 손 경 호**

On the Effect of Bulwarks on Transverse Stability of Box-type Vessels

Myung-Oh Youn · Kyoung-Ho Son

〈 목 차 〉

Abstract	3. 실험
Nomenclature	3-1 실험장치 및 모형선의 명세
1. 서론	3-2 실험방법
2. 이론계산	4. 이론계산과 실험결과의 비교검토
2-1 정식화	5. 결론
2-2 복원아압의 계산법	참고문헌

Abstract

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

Stability problem is very important for vessels. In order to increase transverse stability, this paper employs bulwarks along the upper deck sides of box-type vessels and the emphasis is laid upon the effect of bulwarks 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 vessels 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 box-type vessels is very effective for increase of transverse stability at the heeling angles from about 15 degrees to about 30 degrees.

* 정회원, 목포해양전문대학

** 정회원, 한국해양대학

Nomenclature

- B : breadth of ship or center of buoyancy
 b : breadth of bulwark
 D : depth from bottom to bulwark top
 d : draft
 f : freeboard
 G : center of gravity
 g : gravity acceleration
 \overline{GM} : metacentric height
 GZ : righting arm
 K : heeling moment
 L : length of ship
 p : hydrostatic pressure
 V : displacement volume
 W : displacement
 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
 $0-yz$: coordinate system fixed in the ship
 $0-\eta\zeta$: coordinate system fixed relative to the earth
 ϕ : heeling angle
 ρ : density of water
 ζ_0 : sinkage of ship

1. 서 론

해양공간, 해양자원 및 해양에너지 등의 이용을 위한 해양개발의 필요성으로 인하여 최근 해양구조물의 이용도와 그 수요가 점차 증대되고 있다.

해양구조물은 용도에 따라 형태가 다양하며 plant barge 선, 반잠수형 crane barge 선 그리고 일반 작업선 등과 같은 box-type 부유식 구조물¹⁾(이하 상자형 부유체라 칭함)은 해양구조물의 가장 기본적인 형상으로서 1970년대 중하반기부터 많이 건조되고 있다²⁾.

부유구조물이 갖추어야 할 기본적인 성능으로서는 크게 복원성능과 내파성능(耐波性能)이 있을 것이며, 본 논문에서는 복원성능 향상의 한 방안으로 수밀 bulwark를 설치한 상자형부유체에 있어서, bulwark의 효능을 중심으로 한 복원성능 문제를 다루고자 하였다. 선

박의 복원성능 향상방안에 대해서는 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔으나 소형어선에서 많이 채용되고 있는 돌출형 bulwark가 복원성능에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 이론적으로 규명된 연구가 없는 듯하다.

본 논문에서는 상자형부유체의 상갑판 양현측에 수밀 bulwark를 설치하였을 때, 이 bulwark가 복원성능에 미치는 영향을 유체정역학적 이론계산에 의해 정식화하였으며 수조실험을 병행하였다. 그리하여 본 계산방법의 타당성을 입증하였으며 bulwark의 형상변화가 복원성능에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 이론 계산

2-1 정식화

해상 plant barge선 및 작업선 등의 실제형상은 Fig.2-1과 같다³⁾. 그러나 이론계산의 편의를 위해 Fig.2-2와 같이 직사각형의 등단면(等斷面)을 갖는 상자형 부유체로 가정한다. 그리고 상갑판 양현측에는 등단면을 갖는 수밀 bulwark가 설치되어 있다고 가정한다.

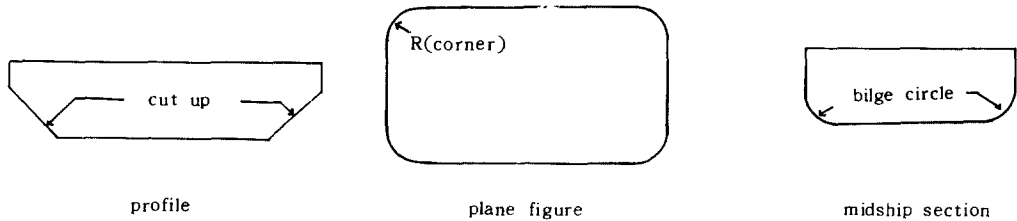


Fig. 2-1 Typical shape of actual barge

수밀 bulwark가 정수(靜水)중에서의 횡복원성능에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 여러 횡경사각에 대해서 복원아암이 어떻게 변화하는가를 조사하여야 한다.

본 논문에서는 정수중에서의 복원성능만을 논하기 때문에 파랑에 의한 갑판수유입의 영향은 고려하지 아니한다.

2-1-1 좌표계

좌표계는 Fig.2-2와 같이 취한다.

(1) 선체고정 좌표계(O-yz)

경사각 $\phi=0$ 일 때의 수면을 y축으로 취하고, 선체의 중심선을 지나고 y축에 수직하게 하 방향으로 z축을 취한다.

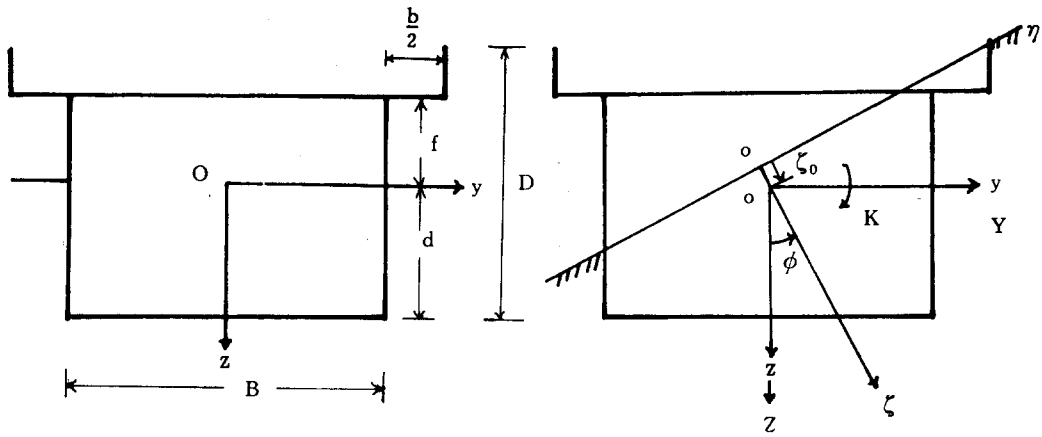


Fig. 2-2 Cross section shape of box-type vessel and coordinate system.

(2) 공간고정 좌표계 ($O'-\eta\zeta$)

경사에 관계없이 수면을 η 축으로 취하고, O 점을 지나며 η 축에 수직하게 하방으로 ζ 축을 취한다. 그리고 좌표원점 O' 는 η 축과 ζ 축의 교점에 있다. 여기에서 O 점의 ζ 좌표를 ζ_0 라 하면 ζ_0 는 선체침하량이 된다.

횡경사각을 ϕ 라 할 때 선체고정 좌표계 $O-yz$ 와 공간고정 좌표계 $O'-\eta\zeta$ 와는 다음의 관계가 성립한다⁴⁾.

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

2-1-2 정수압과 횡경사 모우먼트

선체에 작용하는 정수압은 유체정역학에서 다음 식으로 표시된다.

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

(2)식을 선체고정 좌표계를 써서 표시하면 다음과 같다.

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

선체에 작용하는 힘과 모우먼트는 수면하부의 선체표면에 작용하는 압력 p 에 의해 발생한다. 수면하부의 선체표면적을 s , 수면하부의 선체용적을 V , 선체표면의 면적요소 ds 에 세운 외향의 단위법선벡터를 $\mathbf{n}(n_x, n_y, n_z)$, 원점 O 로부터 ds 까지의 위치벡터를 $\mathbf{r}(y, z)$ 라 하면 선체에 작용하는 힘 \mathbf{F}_w 와 모우먼트 \mathbf{M}_w 는 다음과 같이 나타낼 수 있다⁵⁾.

$$\mathbf{F}_w = - \iint_s p \mathbf{n} ds \dots\dots\dots (4)$$

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

선체의 y, z 축 방향으로 작용하는 힘을 각각 Y, Z 라 하고 O 점 주위의 횡경사 모우먼트를 K 라 하면 Y, Z, K 는 (4), (5)식으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$Y = - \iint_S p n_y ds \dots\dots\dots(4-1)$$

$$Z = - \iint_S p n_z ds \dots\dots\dots(4-2)$$

$$K = - \iint_S p (y n_z - z n_y) ds \dots\dots\dots(5-1)$$

Y, Z, K 는 면적적분을 체적적분으로 변환하는 Gauss의 정리¹⁾를 이용하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

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

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

한편 선체가 떠 있다 함은 선체에 작용하는 정수압에 의해 발생하는 힘 Y, Z 의 연직방향 성분과 선체의 중량이 평형을 이룬 상태임을 의미하며, 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서 W 는 선체의 중량이고 수선하부의 선체용적 V 와는 다음의 관계가 성립한다.

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

2-2 복원아암의 계산법

Fig. 2-3에서 복원모우먼트는 $W \cdot \overline{GZ}$ 로 표시될 수 있고 모우먼트의 작용점은 무게중심 G 이다. 그러나 정수압에 의한 횡경사모우먼트 K 는 O 점을 중심으로 하여 계산된 값이므로 무게중심 G 주위의 모우먼트에 관한 평형조건으로부터 다음 관계가 성립한다.

$$W(\overline{GZ} - z_G \sin \phi) + K = 0$$

(단, z_G 는 무게중심 G 의 z 좌표)

따라서 \overline{GZ} 는 다음과 같이 표시된다.

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

상자형부유체는 등단면을 갖는 선체이므로 선체길이가 단위길이인 2차원 선체로 간주할 수 있다.

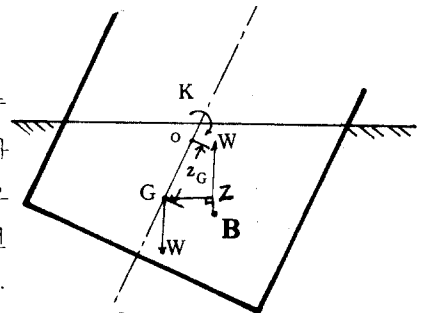


Fig. 2-3 Relation between heeling moment and righting moment.

2-2-1 경사각의 분류

경사각 ϕ 가 0에서 $\frac{\pi}{2}$ 까지 변화하는 동안의 $\overline{GZ}(\phi)$ 의 변화를 조사하기 위해 수면과 선체형상의 관계로부터 \overline{GZ} 의 성질이 변화하는 횡경사각을 Fig. 1-4와 같이 분할하였다.

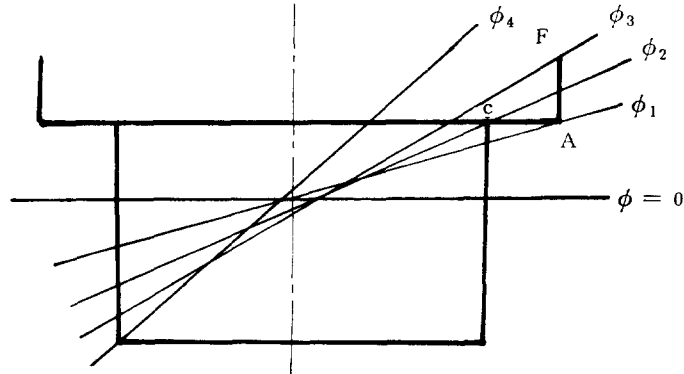


Fig. 2-4 Division of heeling angles

Fig. 2-4에서 각 경사각은 다음과 같다.

- ϕ_1 : bulwark가 잠기기 시작하는 각도
- ϕ_2 : bulwark의 하면(下面)이 전부 잠기는 각도
- ϕ_3 : 수면이 bulwark를 넘는 각도
- ϕ_4 : 선저가 공중에 노출하기 시작하는 각도

따라서 경사각의 범위를 다음의 5 단계로 분류할 수 있다.

- 제 1 단계 $\dots\dots 0 \leq \phi < \phi_1$
- 제 2 단계 $\dots\dots \phi_1 \leq \phi < \phi_2$
- 제 3 단계 $\dots\dots \phi_2 \leq \phi < \phi_3$
- 제 4 단계 $\dots\dots \phi_3 \leq \phi < \phi_4$
- 제 5 단계 $\dots\dots \phi_4 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$

이하 각 단계별로 복원아암 \overline{GZ} 의 계산법을 논한다.

2-1-2 복원아암(\overline{GZ})의 계산법

(1) 제 1 단계 ($0 \leq \phi < \phi_1$).

① ϕ_1 의 계산

Fig. 2-5에서 bulwark의 끝단 A가 수면에 닿는 각이 ϕ_1 이 될 것이며 A점의 좌표는

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

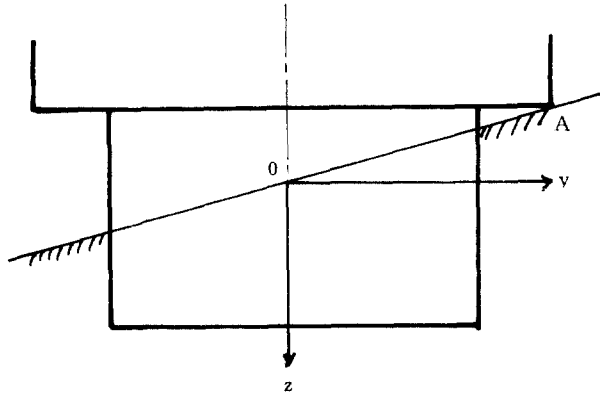


Fig. 2-5 1st phase of heeling angles ($0 \leq \phi < \phi_1$)

따라서 A점의 ζ 좌표는 식(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 선체침하는 일어나지 아니하므로 경사각이 ϕ_1 일 때 $\zeta_A = 0$ 이 된다.

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

이 되며 식(12)로부터 ϕ_1 이 결정된다.

② K 모우먼트의 계산

수면의 z 좌표를 $z_w(y)$ 로 나타내면

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

2차원 선체에 대한 경사모우먼트 K는 식(8)로부터

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

이때 정수압 P는 식(3)에서 $\zeta_0 = 0$ 인 경우이므로

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

따라서 K는 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

③ GZ의 계산

2차원 선체에 대한 배수량 W는

$$W = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} dy \int_0^d \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{\phi=0} dz = \rho g \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} dy \int_0^d dz = \rho g B d \dots\dots\dots(17)$$

따라서 식(11)에 의해

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

한편 폭 B , 흘수 d 인 상자형부유체의 경우 z_G 와 \overline{GM} 과의 관계는 다음과 같다.

$$z_G = \frac{d}{2} - \frac{B^2}{12d} + \overline{GM} \dots (19)$$

(2) 제 2 단계 ($\phi \leq \phi < \phi_2$)

① ϕ_2 및 ζ_0 의 계산

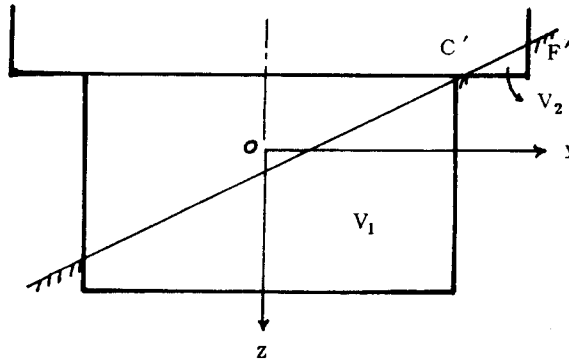


Fig. 2-6 2nd phase of heeling angles ($\phi_1 \leq \phi < \phi_2$)

이 단계에서는 bulwark 의 일부가 물에 잠기므로써 얻어지는 부가적인 부력에 의해 선체는 ζ_0 만큼 부상한다. 이때 수면의 z 좌표 z_w 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

점 C' 에서 $z = -f$ 므로 C' 의 y 좌표는 식(20)으로부터

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

로 나타난다. 또 점 F' 에서 $y = \frac{1}{2}(B+b)$ 이므로 점 F' 의 z 좌표는 식(20)으로부터

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

가 된다.

또한 Fig. 2-6 과 같이 수선하부의 체적을 V_1, V_2 라 하면 식(10)으로부터 선체의 침하량 ζ_0 가 계산된다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{2} B \left(d - \frac{B}{2} \tan \phi + \frac{\zeta_0}{\cos \phi} + d + \frac{B}{2} \tan \phi + \frac{\zeta_0}{\cos \phi} \right) \\ &= Bd + \frac{B\zeta_0}{\cos \phi} \dots (23) \end{aligned}$$

또한 bulwark의 침하체적 V_2 는

$$V_2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} (B+b) - \frac{f}{\tan \phi} + \frac{\zeta_0}{\sin \phi} \right\} \left\{ \frac{1}{2} (B+b) \tan \phi + \frac{\zeta_0}{\cos \phi} - f \right\} \dots (24)$$

식(17), (23), (24)에 의해서

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

이 식을 ζ_0 에 대해 정리하면 다음과 같은 2차방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & 4\zeta_0^2 + 2\{2(3B+b)\sin \phi - 4f \cos \phi\} \zeta_0 \\ & + \{(B+b)\sin \phi - 2f \cos \phi\}^2 = 0 \dots \dots \dots (25) \end{aligned}$$

식(25)를 풀어서 $\phi = \phi_1$ 에서 $\zeta_0 = 0$ 을 만족시키는 ζ_0 를 구하면

$$\zeta_0 = f \cos \phi - \frac{1}{2} (3B+b) \sin \phi + \sqrt{\{(2B+b)\sin \phi - 2f \cos \phi\} B \sin \phi} \dots (26)$$

또한 $yc' |_{\phi=\phi_2} = \frac{B}{2}$ 이므로 식(21)로부터

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

식(27)로부터 ϕ_2 가 계산된다.

② K모우먼트의 계산

이 단계에서 정수압 p 는 수선하부 체적 V_1 과 V_2 의 표면에 작용하며 K모우먼트는 다음 식으로 표시된다.

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

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

③ \overline{GZ} 의 계산

식(11)에 식(17), (19), (78)을 대입해 정리하면

$$\overline{GZ} = [GZ]_0 + \frac{1}{Bd} \left[\frac{B\zeta_0^3 \sin \phi}{2 \cos^2 \phi} + \frac{\sin \phi}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \left\{ \left(\frac{B+b}{2} \right)^3 - y_c'^3 \right\} \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} \left\{ \zeta_0 (1 + \tan^2 \phi) - f \cos \phi \right\} \left\{ \left(\frac{B+b}{2} \right)^2 - y_{c'}^2 \right\} \\
 & + \frac{1}{2} \sin \phi \left(\frac{\zeta_0^2}{\cos^2 \phi} - f^2 \right) \left(\frac{B+b}{2} - y_{c'} \right) \dots\dots\dots (29)
 \end{aligned}$$

여기에서

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

이며 식(18)의 \overline{GZ} 값이다. 즉 이것은 bulwark 가 설치되어 있지 않고 폭 B , 흘수 d 만으로 충분한 freeboard 를 갖는 단순한 구형단면(矩形斷面)의 상자형부유체에 대한 \overline{GZ} 값을 의미 하며, 식(26)의 나머지 항들은 여기에 부가하여 bulwark 의 영향으로 추가되는 \overline{GZ} 의 증분 이라 할 수 있다.

(3) 제 3 단계 ($\phi_2 \leq \phi < \phi_3$)

이 단계에서는 여전히 bulwark 로 인한 여분의 부력에 의해서 선체는 부상하고 따라서 $\zeta_0 < 0$ 이 된다. 또한 이 단계에서 좌현의 선저는 수면위로 노출되지 않는 것으로 가정한다.

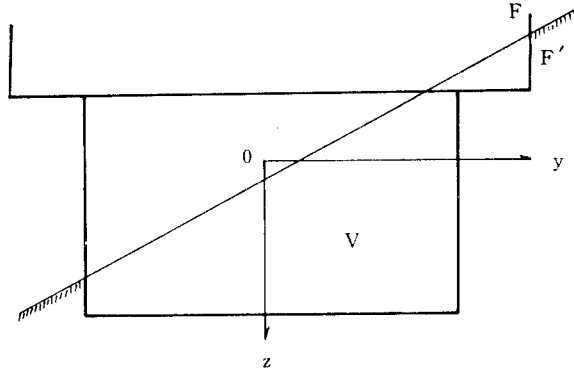


Fig. 2-7 3rd phase of heeling angles ($\phi_2 \leq \phi < \phi_3$)

① ζ_0 및 ϕ_3 의 계산

앞에서와 마찬가지로 수면의 좌표 z_w 는

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

bulwark 와 수면이 만나는 점 F' 의 y 좌표는 $y = \frac{1}{2}(B+b)$ 이므로 점 F' 의 z 좌표

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

식(10)으로부터

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

의 관계가 성립하므로 ζ_0 는

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

한편 식(30)에 $z_{F'} = d - D$ 를 대입하면 ϕ_3 를 구하는 식

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

로부터

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

가 얻어진다.

② K 모우먼트의 계산

이 단계에서 K 모우먼트는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} K &= -\rho g \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} dy \int_{z_w}^d \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz - \rho g \int_{\frac{B}{2}}^{\frac{1}{2}(B+b)} dy \int_{z_w}^f \left(\frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz \\ &= -\rho g \left[\frac{B^3}{12} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \sin \phi + \frac{B \sin \phi}{2} \left(\frac{\zeta_o^2}{\cos^2 \phi} - d^2 \right) \right] \\ &\quad - \rho g \left[\frac{1}{24} \{ (B+b)^3 - B^3 \} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \sin \phi \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{8} \{ (B+b)^2 - B^2 \} \{ \zeta_o (1 + \tan^2 \phi) - f \cos \phi \} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sin \phi}{4} \left(\frac{\zeta_o^2}{\cos^2 \phi} - f^2 \right) b \right] \dots\dots\dots (33) \end{aligned}$$

③ \overline{GZ} 의 계산

식(11), (17), (19), (33)에 따라 이 단계에서의 \overline{GZ} 를 계산하여 정리하면

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

여기서 $[\overline{GZ}]_o$ 는 앞에서와 마찬가지로 식(18)의 \overline{GZ} 값이다.

(4) 제 4 단계 ($\phi_3 \leq \phi < \phi_4$)

이 단계에 있어서는 bulwark가 물에 잠기게 되므로 부력을 형성시키지 못하며 deck가 물에 잠기기 때문에 선체는 침하되어 $\zeta_o > 0$ 이 된다. 또한 이 단계에서는 좌현 선저가 수면위로 노출되지 않는 것으로 가정한다.

① ζ_o 및 ϕ_4 의 계산

이 단계에서 수면의 z 좌표 z_w 는 앞에서와 같이

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

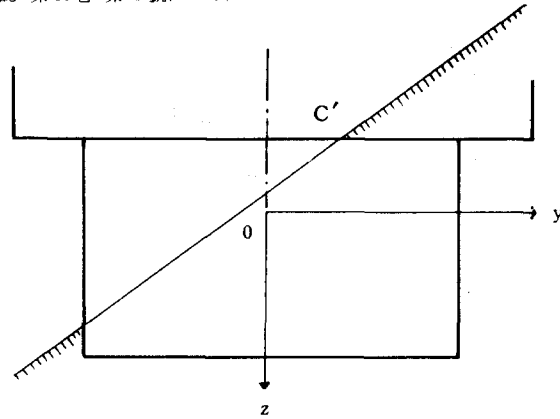


Fig. 2-8 4th phase of heeling angles ($\phi_3 \leq \phi < \phi_4$)

갑판과 수선이 만나는 C' 점의 z 좌표는 $-f$ 이고 y 좌표는 윗식의 z_w 에 $-f$ 를 대입하여 정리하면

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

$\rho g V = W$ 이므로 선체침하량 ζ_o 를 구하는 평형방정식은 다음과 같다.

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

이를 ζ_o 에 대해서 정리하면 다음과 같이 ζ_o 에 관한 2차방정식을 얻는다.

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

이 식을 ζ_o 에 관해 풀면

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

Bulwark가 침수되어 Fig. 2-9와 같은 상태가 되었을 때 $\zeta_o = 0$ 이므로 $\tan \phi = \frac{2f}{B}$ 일 때 $\zeta_o = 0$ 인 조건을 만족시키는 ζ_o 는

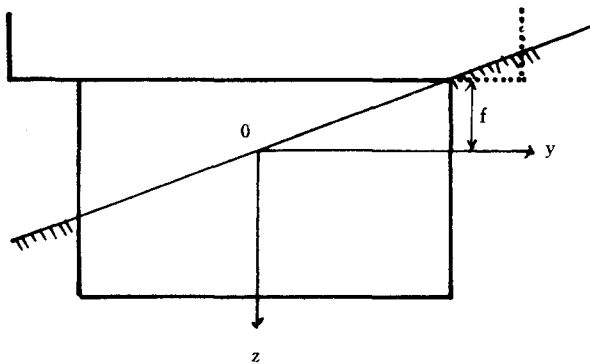


Fig. 2-9 Deck flooding in case of no bulwarks

$$\begin{aligned} \zeta_o &= \frac{\sin \phi \{ (B \tan \phi + 2f) - 2 \sqrt{2fB \tan \phi} \}}{2 \tan \phi} \\ &= \frac{\cos \phi}{2} \{ (B \tan \phi + 2f) - 2 \sqrt{2fB \tan \phi} \} \dots\dots\dots (35) \end{aligned}$$

한편 ϕ_1 는 좌현홀수가 d 일 때의 경사각이므로

$$d = -\frac{\zeta_o}{\cos \phi_1} + \frac{B}{2} \tan \phi_1$$

따라서

$$\tan \phi_1 = \frac{(d+f)^2}{2fB} \dots\dots\dots (36)$$

② K 모우먼트의 계산

이 단계에서 K 모우먼트는 다음 식으로 표시된다.

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

③ \overline{GZ} 의 계산

식 (11), (17), (19), (37)에 따라 이 단계에서의 \overline{GZ} 를 계산하여 정리하면

$$\begin{aligned} \overline{GZ} &= [\overline{GZ}]_o + \frac{1}{Bd} \left[\frac{B \zeta_o^2 \sin \phi}{2 \cos^2 \phi} - \frac{\sin \phi}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \phi \right) \left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^3 - y_c'^3 \right\} \right. \\ &\quad - \frac{1}{2} \left\{ \zeta_o (1 + \tan^2 \phi) - f \cos \phi \right\} \left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^2 - y_c'^2 \right\} \\ &\quad \left. - \frac{\sin \phi}{2} \left(\frac{\zeta_o^2}{\cos^2 \phi} - f^2 \right) \left(\frac{B}{2} - y_c' \right) \right] \dots\dots\dots (38) \end{aligned}$$

(5) 제 5 단계 ($\phi_1 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$)

이 단계에서는 경사 반대현측 선저부가 수면위로 노출된 이후부터의 경사각에 대해 계산한다.

① ζ_o 의 계산

수면의 z 좌표는

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

선저와 수면의 교점 F' 에서 z 좌표 $z_w = d$ 이므로 y 좌표는

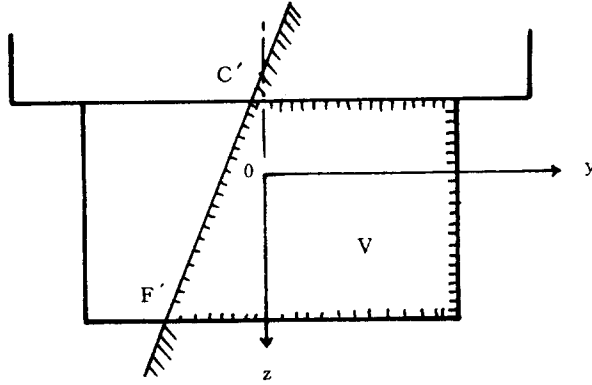


Fig. 2-10 5th phase of heeling angles ($\phi_1 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$)

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

갑판이 수면과 만나는 점 C' 에서의 z 좌표는 $z_w = -f$ 이므로 y 좌표는

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

$\rho g V = W$ 이므로 선체침하량 ζ_o 를 구하는 평형방정식은 다음과 같다.

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

ζ_o 에 대해서 정리하면

$$\zeta_o = (d-f) \left\{ \frac{B \sin \phi}{2(d+f)} - \frac{1}{2} \cos \phi \right\} \dots \dots \dots (39)$$

② K 모우먼트의 계산

이 단계에서 K 모우먼트는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} K &= -\rho g \int_{y_{F'}}^{y_{C'}} dy \int_{z_w}^d y \left(\frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz - \rho g \int_{y_{C'}}^{\frac{B}{2}} dy \int_{-f}^d \left(y \frac{\partial p}{\partial z} - z \frac{\partial p}{\partial y} \right) dz \\ &= \rho g \left[\frac{1}{3} (y_{C'}^3 - y_{F'}^3) \left(\sin \phi + \frac{1}{2} \sin \phi \tan^2 \phi \right) + \frac{1}{2} (y_{C'}^2 - y_{F'}^2) \right. \\ &\quad \times \left. \left(d \cos \phi + \zeta_o + \zeta_o \tan^2 \phi \right) - \frac{1}{2} \sin \phi (y_{C'} - y_{F'}) \left(d^2 - \frac{\zeta_o^2}{\cos^2 \phi} \right) \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} \rho g (d+f) \left[\left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^2 - y_{C'}^2 \right\} \cos \phi - \left\{ \left(\frac{B}{2} - y_{C'} \right) (d-f) \sin \phi \right\} \right] \dots \dots (40) \end{aligned}$$

③ \overline{GZ} 의 계산

식 (11), (17), (19), (40)에 따라 이 경사구간 내에서의 \overline{GZ} 를 계산하여 정리하면

$$\begin{aligned} \overline{GZ} &= \frac{1}{Bd} \left(\frac{1}{3} (y_{C'}^3 - y_{F'}^3) \left(\sin \phi + \frac{1}{2} \sin \phi \tan^2 \phi \right) + \frac{1}{2} (y_{C'}^2 - y_{F'}^2) \right. \\ &\quad \left. (d \cos \phi + \zeta_o + \zeta_o \tan^2 \phi) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}(y_{c'} + y_{F'}) \sin \phi (d^2 - \zeta_o^2 / \cos^2 \phi) + \frac{1}{2}(d+f) \left\{ \left(\frac{B}{2} \right)^2 - y_{c'}^2 \right\} \cos \phi \\
 & - \frac{1}{2}(d+f) \left\{ \left(\frac{B}{2} \right) - y_{c'} \right\} \sin \phi (d-f) \Big] + z_G \sin \phi \dots\dots\dots (41)
 \end{aligned}$$

이상과 같이 수밀 bulwark 를 갖는 상자형부유체가 계속적으로 경사하는 동안 선체침하량 ζ_o 와 복원아암 \overline{GZ} 를 각 단계별로 연속적으로 계산할 수 있다. 계산결과에 대해서는 제 4 장에서 논한다.

3. 실험

수밀 bulwark 가 설치된 상자형부유체의 복원성능에 대한 이론식을 정식화하고 복원아암 \overline{GZ} 의 계산식을 규명하였다. 계산결과에 대한 확인을 위하여 다음과 같이 수조실험(水槽實驗)을 수행하였다.

3-1 실험장치 및 모형선의 명세

3-1-1 실험장치

실험장치는 영국의 Armfield 사가 제작한 Large Angle Ship Stability Dynamometer 이며 Fig. 3-1 에 개략적인 그림을 보인다. 이 장치는 선체를 물에 띄워 강제적으로 경사시켰을 때 주어진 경사각에서 이 선체에 작용하는 복원모우먼트를 측정하도록 되어 있다^{7), 8)}.

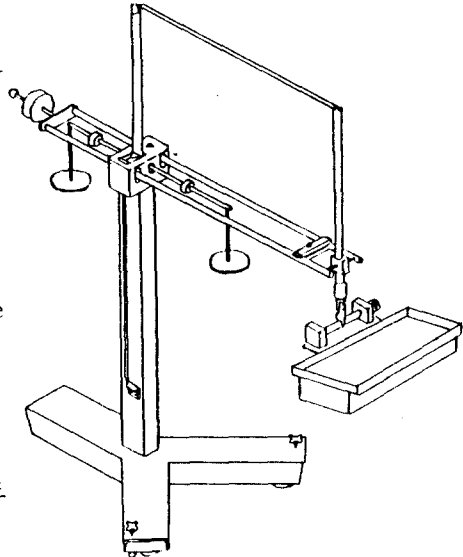
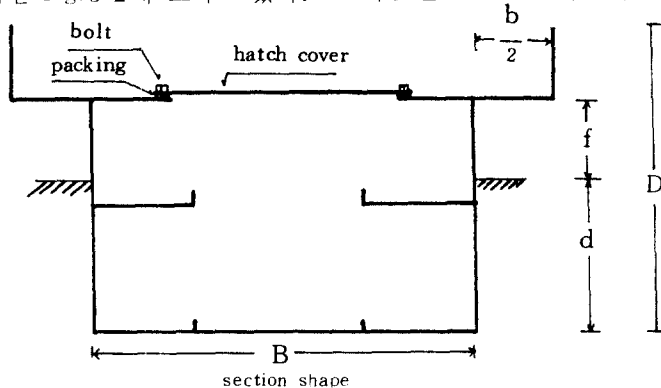


Fig. 3-1 The model ship and large angle ship stability dynamometer

3-1-2 모형선의 형상

모형선의 형상은 Fig. 3-2 에 보이고 있다. 그 구조는 ballast weight 의 조정으로 중심 G



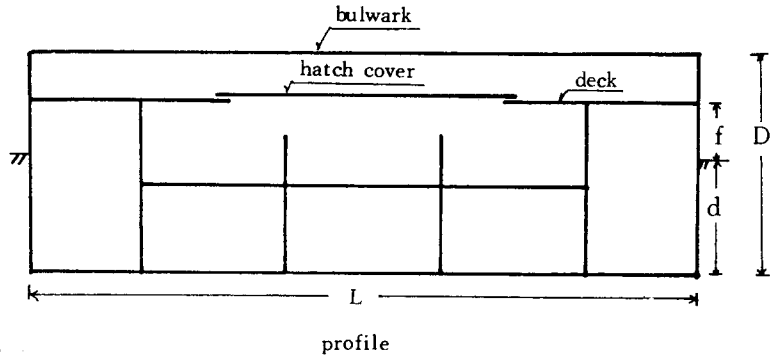


Fig. 3-2 Layout of model ship

의 위치를 조절하기 위해 twin deck 와 4 개의 격벽을 설치하였으며, 투명 아크릴 수지로서 직접 제작하였다.

3-1-3 모형선의 주요목(主要目)

모형선의 주요목은 Table 3-1 과 같다.

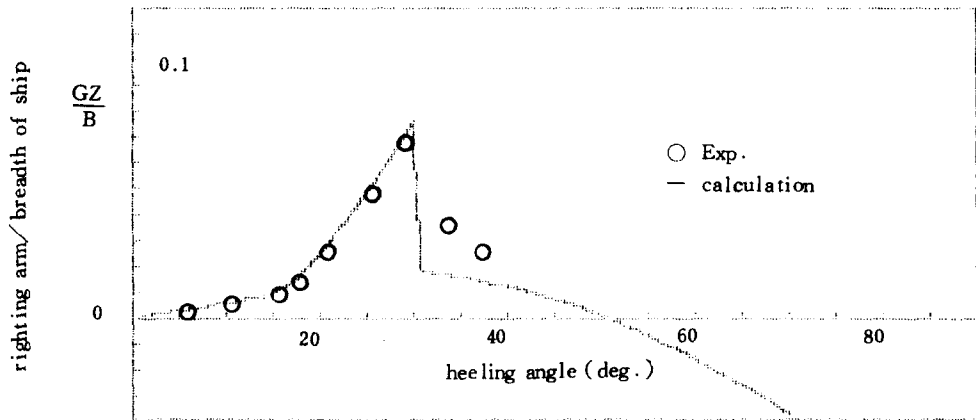
Table 3-1 Principal dimensios of models

model ships		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 from bottom to bulwark top	(D)	0.20 m	0.20 m
mean draft	(d)	0.10425m	0.106 m
freeboard	(f)	0.04575m	0.044 m
GM		0.03B	0.028B
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/b		0.439	0.415

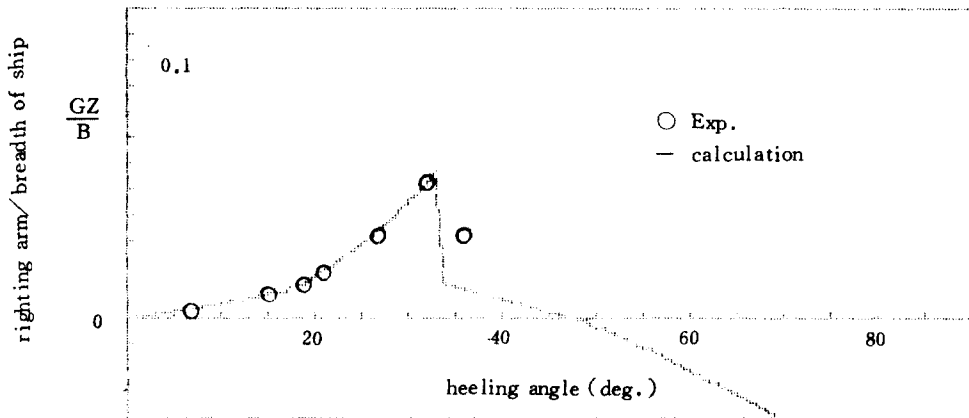
3-2 실험방법

다음과 같은 순서로 실험을 진행하였다.

- ① 모형선내에 ballast weight 를 채워 흘수, trim 및 heeling 을 조정한다.
- ② 흘수 및 저울에 의해 모형선의 중량을 구한다.
- ③ 경사시험을 하여 \overline{GM} 을 구한다.
- ④ 모형선을 실험장치에 부착, 고정하여 경사각을 변화시키면서 경사모우먼트를 측정한다.
- ⑤ 복원모우먼트로부터 복원아암(\overline{GZ})을 구한다.



model 1



model 2

Fig. 4-1 Stability curve of model ships.

4. 이론계산과 실험결과의 비교검토

모형선 1 과 모형선 2 의 주요목을 자료로 하여 복원아암(\overline{GZ})을 이론계산으로 구하여 정적복원력곡선을 그리고, 여기에 실험을 통하여 얻은 복원아암을 기점하여 Fig.4-1에 나타냈다. 여기서 \overline{GZ} 는 그 크기를 선폭으로 나누어 무차원화(無次元化)하였다.

Fig.4-1 의 결과로부터 다음 사항을 알 수 있다.

- ① 이론계산치와 실험치가 거의 일치하지만 갑판침수각 이후에 약간의 차를 보인다. 이것은 이론계산의 경우 bulwark 의 두께가 무시되었으나, 실험의 경우 모형선은 bulwark 가 비교적 큰 두께를 갖게되어 침수시 복원모우먼트를 형성하기 때문이라 추측된다.
- ② bulwark 의 효과는 bulwark 가 없는 상태의 복원아암에 bulwark 에 의해 얻어지는 부가적인 복원아암이 더해지는 것으로 나타난다.
- ③ bulwark 의 효과는 bulwark 가 침수될 때부터 시작하여 갑판침수 직전까지 나타나며, 이 사이에서 \overline{GZ} 는 점점 증가하여 갑판침수 직전에서 최대의 복원아암(\overline{GZ}_{max})을 보인다.
- ④ 모형선 1 과 2 의 비교에서 보이듯이 선폭에 대한 bulwark 폭의 비가 클수록 \overline{GZ}_{max} 가 커지나 갑판침수각이 작아져 bulwark 의 효과가 좁은 범위에서 나타난다.

5. 결 론

지금까지 논한 상자형부유체의 횡복원성에 미치는 bulwark 의 영향에 관한 이론계산 및 실험의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 복원성능의 평가 방법으로서 정수압의 체적적분에 의해 복원력을 계산하는 유체정역학적 방법이 정도(精度)가 높고 유용함을 확인하였다.
- 2) 수밀 bulwark 를 설치하므로써 중정도의 경사각(약 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$)에서 복원성능이 크게 향상됨을 확인하였다.
- 3) 선폭에 대한 bulwark 폭의 비가 클수록 최대복원아암은 커지나, 갑판침수각이 작아져 bulwark 의 효과가 좁은 범위에서 나타난다.

참 고 문 헌

- 1) 小岩健；箱型船の安定性能について，作業船，第99號(1975)．
- 2) 石川島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)．
- 3) 小岩健；作業船の復原性能について，作業船，第60號(1968)．

- 4) 中川憲治 ; 工科のための一般力學, 森北出版社株式會社, p. 114(1968).
- 5) 元良成三 ; 船體と海洋構造物の運動學, 成山堂, p. 2(1982).
- 6) Erwin Kreisig ; Advanced engineering Mathematics, John Wiley & Sons, p. 441(1983)...
- 7) R. L. Townsin ; Instruction Manual for NA8 Large Angle Ship Stability Dynamometer, Armfield Co. (1983).
- 8) Ir. R. F Scheltema de Heere ; Buoyancy and Stability of Ship, Netherlands, p. 14(1971).