

減搖水槽의 性能에 關하여 (1)

禹 奉 九*, 具 鍾 道*

On the Performance of the Anti-Rolling Tank (1)

by

Bong Koo Woo and Jong Do Koo

Abstract

In terms of this paper, concerning primarily with the U-tube tank stabilizer, the authors' aim is to clarify and consolidate the theory as it has been developed thus far, and to provide with the certain additions which will make it more complete, more accurate, and more practical.

And then we can know that the effect of the vertical tank position from the C.G, $a_{st}=1-w^2/w_{st}^2$, is very important, on account for the fact that the position factor, a_{st} , increase when the anti-rolling tank attaches to higher position vertically, but a_{st} does not increase in proportion to the distance of the tank position.

Measuring many characteristic coefficients by experiment, in the equation of the ship-tank system motion, such as the inertia coefficient, the damping coefficient, the natural frequency and so on, they can also give a guess that the higher position will accompany the non-linear motion of the tank water, but the non-linear effect will decrease the tank ability.

In this study, they deal with not only the optimum damping coefficient of tank, which has very simply been expressed by the strength ratio, λ , but also the effect of the tank top, which has experimentally been treated when the water has hit the tank top.

As this result, we can immediately find that the ability of the anti-rolling tank decrease at $w/ws=0.9$ generally low frequency.

1. 緒 言

船에 取付된 受動型 感搖水槽(passive anti-rolling tank)는 지금까지 研究된 理論과 實驗에서 一般的으로 安定性面에 對하여 約 50%~80% 程度의 效果를 얻을 수 있음을 잘 알 수 있다. 本研究에서는 特히 位相差(phase angle difference) 및 減搖水槽의 固有周期(natural frequency)와 減衰係數(damping coefficient)에 關하여 論하기로 한다.

2. 減搖水槽—船系의 運動方程式

減搖水槽—船系의 線型運動方程式은 아래 式과 같다[1].

$$\left. \begin{aligned} J_s\ddot{\theta} + B_s\dot{\theta} + K_s\theta + J_{st}\ddot{\phi} + K_{st}\phi &= M_w \\ J_{st}\ddot{\theta} + K_{st}\theta + J_t\ddot{\phi} + B_t\dot{\phi} + K_t\phi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

但, $K_{st}=K_t$

接受日字 1971年 11月 10日

* 正會員, 仁荷工科大学

(1)式的 解를

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \theta e^{i(\omega t - \epsilon_s)} \\ \phi &= \phi e^{i(\omega t - \epsilon_t)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

但, ϵ_s 와 ϵ_t 는 θ 와 ϕ 의 波에 關한 位相差이다.

로 놓을 수 있고 (1)式的 解를 풀어서 magnification factor, $\mu = \left| \frac{\theta}{\theta_w} \right|$ 를 求하면 아래 式과 같은 結果를 얻는다.

$$\mu = \left| \frac{\theta}{\theta_w} \right| = \frac{\tau}{\sqrt{\left(a_s - \frac{a_{st}^2 \lambda a_t}{a_t^2 + b_t^2} \right)^2 + \left(b_s + \frac{a_{st}^2 \lambda b_t}{a_t^2 + b_t^2} \right)^2}} \quad (3)$$

$$\tan \epsilon_\theta = \frac{b_s + \frac{\lambda' b_t}{a_t^2 + b_t^2}}{a_s - \frac{\lambda' a_t}{a_t^2 + b_t^2}} \quad (4)$$

但, $\lambda' = \lambda \cdot a_{st}^2$

3. 實驗方法—Bench Tester

本研究에서 實驗用으로 使用한 供試船型은 GT 750 ton 級 自動車運搬船이며, 模型船은 Fig. 1에 表示된 尺처럼 實船의 寸法을 1/10의 scale로 製作하였으며 實船의 寸法은 아래 表와 같다.

表 1. GT 750 ton 級 自動車運搬船의 寸法

$L \times B \times D \times d$	57.00 m \times 12.00 m \times 4.00 m \times 2.76 m
C_B	0.55
A	1029.48 ton
KG	4.99 m
GM	0.92 m
T_t	11.10 sec
T_s/T_t	1.14

- a) navigation deck 上
- b) boat deck 上
- c) 船의 重心으로부터 $Z_o = h - h_d$ 의 基點上 (重心에 가까움)
- d) double bottom 上

Z_o 에 놓은 減搖水槽를 標準水槽로 選定하고 其他 條件들을 同一하게 하여서 水槽의 長이를 a_{st} 倍하여 變化시키면 位置에 依한 tank strength ratio λ 를 갖는 水槽를 製作할 수 있으며 그 長이 方向에서 水槽크기의 變化量을 求하는 方法을 說明하기로 한다.

a) navigation deck ($Z=52.75$ cm) 上

$$w_{st}^2 = -\frac{g}{h - h_d - z} = -21.8$$

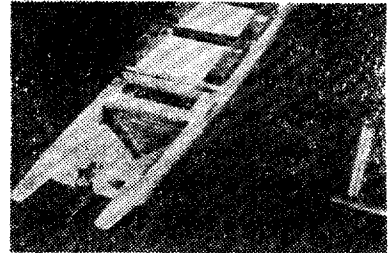


Fig. 1 (a) Ship model with anti-rolling tank

그리고 實驗은 供試船型에 取付된 減搖水槽의 plastic 製 模型을 bench-tester 上에 設置하여 實施하였고, Fig. 2 에서는 bench-tester 에서의 實驗狀態를 보여주고 있으며 減搖水槽의 位置效果를 檢討하기 爲하여 實驗位置로 다음 4個所를 選擇하였다.

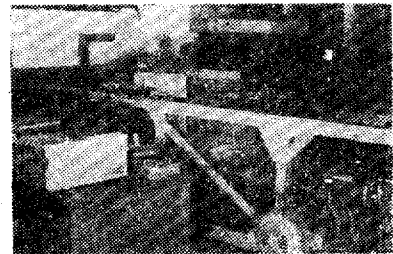


Fig. 1 (b) Bench-tester operation

$$a_{s1} = 1 - \frac{w_s^2}{w_{s1}^2} = 1.158$$

$$l_1 = l \times a_{s1}^2 = 15.10 \text{ (cm)}$$

b) boat deck ($Z = 30.50 \text{ cm}$)

$$a_{s1} = 1.08$$

$$l_2 = l \times a_{s1}^2 = 13.2 \text{ (cm)}$$

c) $Z_0 = h - h_d = 7.80 \text{ (cm)}$

$$w_{s1}^2 = \infty$$

$$a_{s1}^2 = 1$$

$$l = 11.30 \text{ (cm)}$$

d) double bottom ($Z = -37.40 \text{ cm}$) 上

$$a_{s1} = 0.84$$

$$l_3 = l \times a_{s1}^2 = 7.95 \text{ cm}$$

但, 波傾斜는 3° 와 5° 에 對하여 實驗하였다.

4. 位相差(Phase angle difference)

보편적으로 減搖水槽의 位相差는 $\pi/2$ 가 될 때 가장 効果的이며 그 位相差에 關한 式은 아래와 같다. [2]

$$M_t = -J_{s1}\ddot{\phi} - K_{s1}\phi = -a_{s1}K_t\phi \tag{5}$$

$$\epsilon_{m\phi\theta} = \tan^{-1} \frac{B_t/K_t \cdot w}{1 - w^2/w_t^2} = \tan^{-1} \frac{b_t}{a_t} \tag{6}$$

그러면 減搖水槽의 位置를 고려하여 減搖水槽를 a) 重心보다 上方, b) 重心上, c) 重心보다 下方에 놓아 벤치테스터(Bench-tester)台上에서 實驗에 依하여 測定한 位相差曲線에 關해서 細部的로 說明하기로 한다.

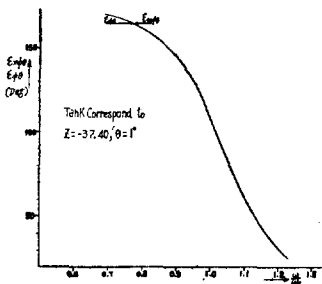


Fig. 2 (a) Phase angle difference with $\theta=1^\circ$

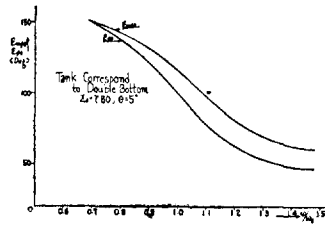


Fig. 2 (b) Phase angle difference with $\theta=3^\circ$

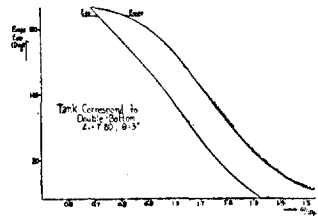


Fig. 2 (c) Phase angle difference with $\theta=5^\circ$

Fig.2(a)는 λ'_e 에 該當하는 水槽를 重心上에 놓고 動搖角 $\theta=1^\circ$ 로 하였을 때 水槽內 물의 搖角 ϕ 와 船의 橫搖角 θ 와의 位相差인 $\epsilon_{\phi\theta}$ 와 水槽內 물의 모우먼트와 θ 와의 位相差인 $\epsilon_{m\phi\theta}$ 를 測定한 結果이며, $w/w_s=1.0$ 即 同調(resonance) 狀態에서는 $\epsilon_{m\phi\theta}$ 가 100° 程度로써 $\pi/2$ 에 接近하므로 좋은 結果라 할 수 있고, Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)와 同一狀態이나 單只 動搖角 $\theta=3^\circ$ 인 경우에 關한 實驗結果로 $\epsilon_{\phi\theta}$ 와 $\epsilon_{m\phi\theta}$ 가 一致하지 않음을 알 수 있다. 그 原因은 $\theta=3^\circ$ 인 경우는 Lagrange의 微小運動을 假定과는 달리 大運動으로 因한 非線型影響이 일어남을 明白히 알려주고 있으며 Fig. 2(c)는 $\theta=5^\circ$ 에 該當하는 位相差曲線이다.

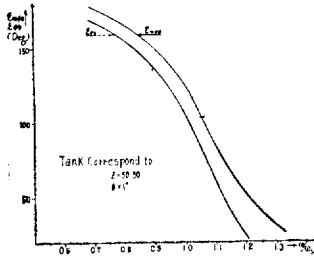


Fig. 3(a) Phase angle difference with $\theta=1^\circ$

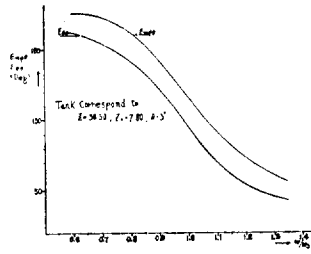


Fig. 3(b) Phase angle difference with $\theta=3^\circ$

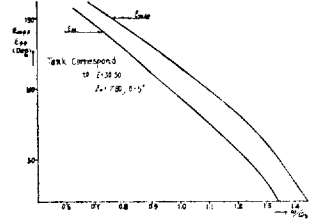


Fig. 3(c) Phase angle difference with $\theta=5^\circ$

Fig. 3(a)~Fig. 3(c)는 減搖水槽를 boat deck 上에 놓은 것에 相當하는 水槽를 重心上에 놓고 實驗한 位相差曲線으로 Fig. 3(a)는 $\theta=1^\circ$, Fig. 3(b)는 $\theta=3^\circ$, Fig. 3(c)는 $\theta=5^\circ$ 에 該當하는 實驗에서 얻은 曲線이다.

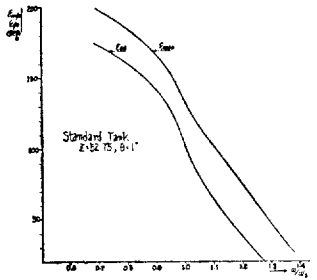


Fig. 4(a) Phase angle difference with $\theta=1^\circ$

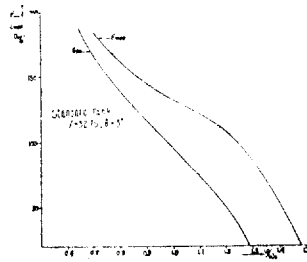


Fig. 4(b) Phase angle difference with $\theta=3^\circ$

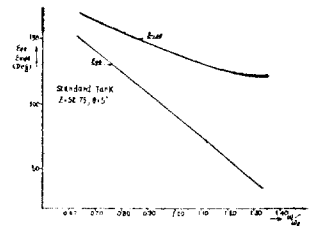


Fig. 4(c) Phase angle difference with $\theta=5^\circ$

Fig. 4(a)~Fig. 4(c)는 標準水槽를 navigation deck ($Z=52.75\text{cm}$) 上에서 $\theta=1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ 일 때 測定值이며 $\theta=5^\circ$ 에서는 w/w_s 의 값이 커짐에 따라 非線型影響이 顯著하게 나타남을 알 수 있다.

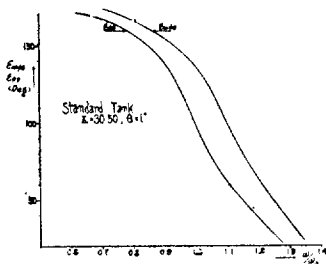


Fig. 5(a) Phase angle difference with $\theta=1^\circ$

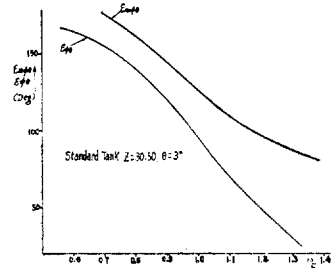


Fig. 5(b) Phase angle difference with $\theta=3^\circ$

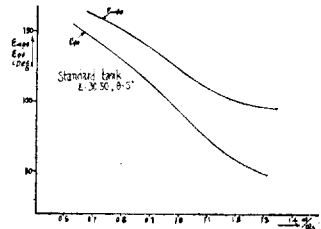


Fig. 5(c) Phase angle difference with $\theta=5^\circ$

Fig. 5(a)~Fig. 5(c)는 標準水槽를 boat deck ($Z=30.50\text{cm}$) 上에서 $\theta=1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ 일 때 測定한 實驗曲線이며 navigation deck 上보다 非線型影響이 적음을 알 수 있다.

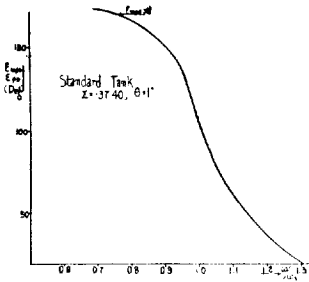


Fig. 6(a) Phase angle difference with $\theta=1^\circ$

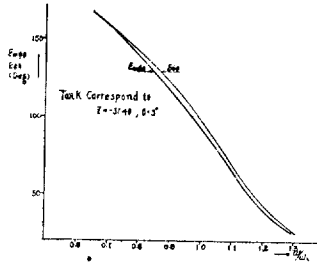


Fig. 6(b) Phase angle difference with $\theta=3^\circ$

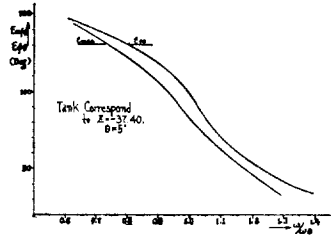


Fig. 6(c) Phase angle difference with $\theta=5^\circ$

Fig. 6(a)~Fig. 6(c)는 標準水槽를 double bottom ($Z = -37.40$ cm) 上에서 $\theta=1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ 에 關한 實驗測定한 位相差曲線이며 여기에서는 非線型影響이 거의 없음을 알 수 있다.

위의 같은 結果로써 水槽位置가 높으면 높은수목, 動搖角이 크면 큰수목 非線型影響이 나타나서 水槽의 效果가 減少됨을 알 수 있다.

5. Tank Damping

5.1 Tank Damping Coefficient

減搖水槽의 減衰係數를 너무 크게 하면, 水槽內 물의 모우먼트를 減少시키는 結果가 되어 減搖效率이 적어지며 너무 적게 하면, 水槽內 물의 모우먼트는 커지나 同調時에 位相差가 $\pi/2$ 에서 멀어 지므로 減搖效果에 惡影響을 끼친다. 그러므로 水槽의 damping coefficient에 對하여 論하는 것도 큰 意義가 있음을 알 수 있다.

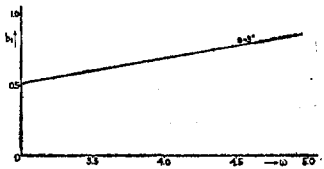


Fig. 7 Damping Coefficient with $\theta=3^\circ$

Fig. 7은 動搖角 $\theta=3^\circ$ 인 경우에 있어서 周波數가 變化함에 따라 tank damping coefficient, b_1 가 如何히 變化하는 가를 나타내고 있으며 周波數가 커짐에 따라 線速度가 增加하므로 tank damping coefficient도 增加함을 알 수 있다. Fig. 8(a)는 水槽內 물의 傾斜角 ϕ 가 增加함에 따라 b_1 가 增加하며 아울러 周波數가 增加함에 따라 b_1 도 增加함을 表示하고 있으며 Fig. 8(b)는 周波數를 橫軸으로 하였을 때 水槽內 물의 傾斜角이 各 一定한 경우의 tank damping coefficient의 影響에 關한 結果를 表示하고 있다.

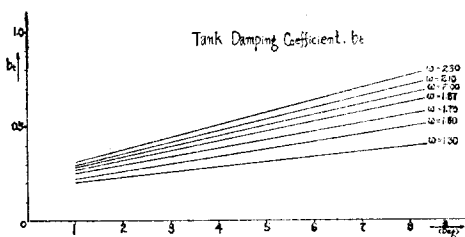


Fig. 8(a) Tank damping coefficient

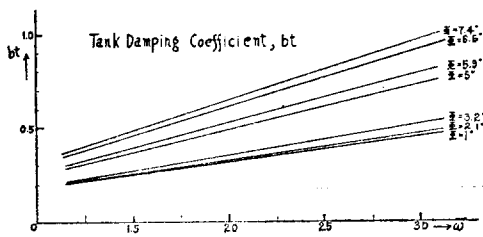


Fig. 8(b) Tank damping Coefficient

5.2 Optimum Damping Coefficient

Stigter 에 依하면 optimum damping coefficient [3]은 다음 식과 같다.

$$(\kappa_t)^2 = 3\mu_p^2 / (8 - 4\mu_p^2) \tag{7}$$

$$\mu_p = c_3 / \sqrt{a_3 \cdot b_3} = K_{st} / \sqrt{K_s \cdot K_t} = \sqrt{\frac{K_t}{K_s}} = \sqrt{\lambda} \tag{8}$$

(8)式에서 우리들은 λ 代身에 λ' 를 代入하여야 한다. 왜냐하면 Stigter 는 減搖水槽의 位置의 影響을 考慮하지 않았기 때문이다.

$$\kappa_t = \frac{b_2}{(b_2)c} = \frac{b_2}{\sqrt{4b_1 \cdot b_3}} = \frac{B_t}{\sqrt{4J_1 \cdot K_t}} \tag{9}$$

optimum damping 條件은

$$\frac{B_t}{\sqrt{4J_1 \cdot K_t}} = \frac{3\mu_p^2}{3 - 4\mu_p^2} = \frac{3\lambda'}{8 - 4\lambda'} \tag{10}$$

임으로

$$b_t = \frac{B_t w}{K_t} = 2w \sqrt{\frac{J_1}{K_t}} \times \sqrt{\frac{3\lambda'}{8 - 4\lambda'}} = \frac{2w}{w_t} \sqrt{\frac{3\lambda'}{8 - 4\lambda'}} \tag{11}$$

이 된다. 同調時에는

$w = w_s = w_t$ 이므로

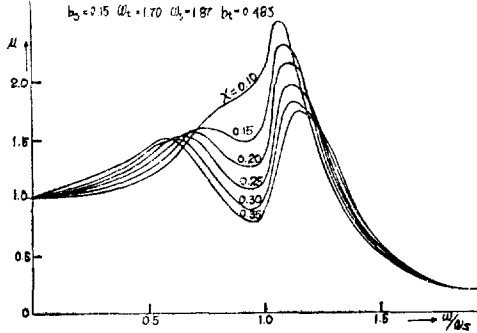


Fig. 9 (a) Magnification factor

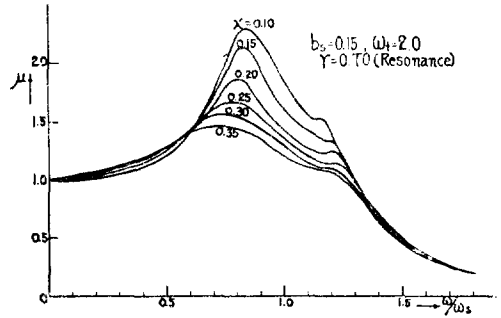


Fig. 9 (b) Magnification factor

$$b_t = \sqrt{\frac{12\lambda'}{8 - 4\lambda'}} \tag{12}$$

(12)式은 tank strength ratio 에 依하여 表示된 optimum damping coefficient 이며 이 條件下에서 理論式에 依한 w_t 가 w_s 보다 $\pm 5\%$ 의 範圍內에서의 橫搖應答曲線이 Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에 나타나 있다.

6. 減搖水槽의 效果에 미치는 位置의 影響

位置에 依한 水槽 모우먼트의 影響은 Fig. 10(a)~Fig. 10(f)에서 表示하고 있다.

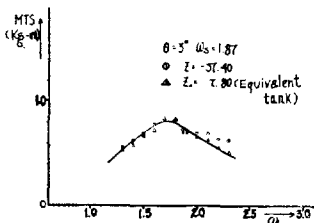


Fig. 10(a) The effect of the tank position ($z = -37.40$ $\theta = 3^\circ$ $z_0 = 7.80$)

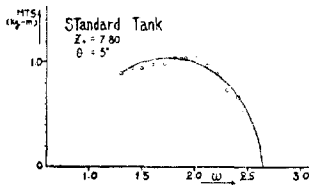


Fig. 10(b) The effect of the tank position ($z_0 = 7.80$; $\theta = 5^\circ$)

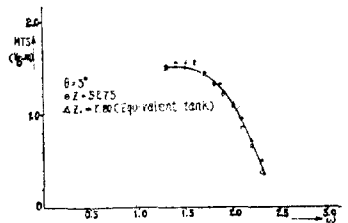


Fig. 10(c) The effect of the tank position ($z = 52.75$ $\theta = 3^\circ$ $z_0 = 7.80$)

Fig. 10(a)는 船의 橫搖角 $\theta=3^\circ$ 일 때 二重底上에 놓은 水槽와 基點上에 놓은 等價水槽와의 實驗에 依한 比較되며 理論上에서 求한 a_{ss}^2 乘한 tank strength ratio 와 standard tank 의 경우와 잘 一致하고 있음을 알 수 있으며 Fig. 10(b)는 標準水槽의 基點上에서 實驗測定한 水槽 모우먼트 曲線이며 Fig. 10(c)는 navigation deck 上의 水槽모우먼트와 等價水槽를 基點上에 놓았을 경우와의 比較曲線이다.

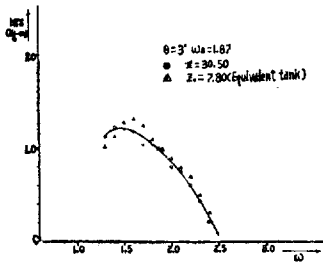


Fig. 10 (d) The effect of tank position
($z=30.50$ $\theta=3^\circ$)
($z_0=7.80$)

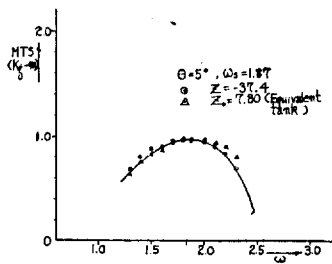


Fig. 10(e) The effect of tank position
($z=30.50$ $\theta=5^\circ$)
($z_0=7.80$)

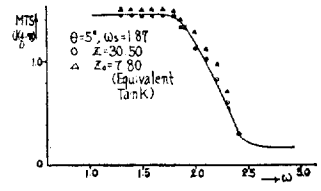


Fig. 10(f) The effect of tank position
($z=-37.4$ $\theta=5^\circ$)
($z_0=7.80$)

Fig. 10(d)는 boat deck 上의 水槽 모우먼트 測定値와 이것에 相當하는 等價水槽의 모우먼트 測定値와의 動搖角 $\theta=3^\circ$ 일 때 比較曲線이며 Fig. 10(e)는 boat deck 上의 水槽에 對한 모우먼트 曲線으로 船의 橫搖角 $\theta=5^\circ$ 인 경우에 關한 것을 나타내었으며 Fig. 10(f)는 二重底上의 水槽로써 $\theta=5^\circ$ 인 橫搖角에 關한 것으로 모두 標準水槽와 等價水槽가 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 그러나 等價水槽의 길이 方向의 크기가 커짐에 따르는 效果만큼 높은 곳에 있는 水槽의 效果는 增加하지 않으며 等價水槽는 線型理論이 成立하는 限度內에 있고 非線型이 되면 水槽效果는 增加하지 않는다는 것을 알 수 있다.

7. 水槽天井에 물이 接觸할 때의 影響

水槽天井에 물이 부딪칠 때의 理論은 參考文獻[2]에 記載되어 있음으로 여기에서는 省略하기로 한다.

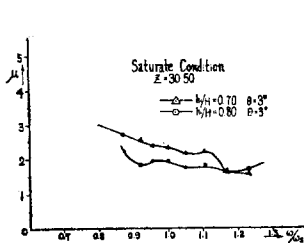


Fig. 11(a) The effect of the tank top

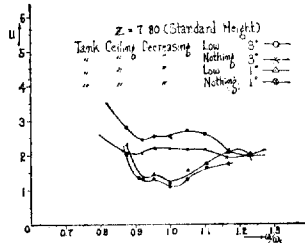


Fig. 11(b) The effect of the tank top

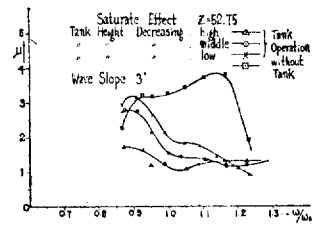


Fig. 11(c) The effect of saturate condition and the condition without tank

Fig. 11(a)는 波傾斜角이 3° 일 때, 水槽天井의 高底의 影響을 表示한 것이며 直接 船에 減搖水槽를 붙여서 船의 應答를 測定한 結果 即 $\mu = \left| \frac{\theta}{\theta_{ss}} \right|$ 를 求하여 縱軸에 置點한 것이고 H는 水槽 높이이고 h_1 은 水槽內 물이 차 있는 높이이며 $h_1/H=0.10$ 은 $\triangle-\triangle$ 으로 表示하고 $h_1/H=0.80$ 은 $-\odot-\odot$ 로 表示되어 있고 saturate

도가 심한 $h_1/H=0.70$ 인 경우가 0.80 인 경우보다 μ 의 값이 각 w 에 대하여 큰 값을 갖는다. 即 saturate 때에는 水槽의 효과가 減少됨을 알 수 있고 Fig. 11(b)는 波傾斜 3° 와 1° 에 관한 것이고 특히 $\text{-}\otimes\text{-}\otimes\text{-}$ 曲線은 진혀 天井에 물이 부딪치지 않는 경우를 나타내며 Fig. 11(c)는 減搖水槽를 붙이지 않는 경우와 水槽의 높이가 3가지로 變化한 경우에 대하여 水槽의 효과를 實驗한 것으로 水槽가 없는 경우에는 $w/w_s=1.0$ 即 同調時에 가장 μ 의 값이 커야 하는데 Fig. 11(c)는 그렇지 않다. 그 이유는 實驗한 模型船의 幅이 매우 크고 조금만 傾斜하여도 側壁에 물이 닿아서 이러한 효과가 나타난 것으로 推測되며 水槽天井에 물이 부딪칠 경우는 一般的으로 低周波數側에서 peak가 생기고 있음으로 saturate 때는 水槽의 효과는 低周波數側에서 減少함을 알 수 있다.

8. Step Input인 경우

減搖水槽의 효과를 step input 即 波形狀이 階段狀인 경우에 대하여 求해 보자. 먼저 船-減搖水槽系의 船型 橫搖方程式 (1)式을 analog computer에서 解를 얻기 爲하여 다음의 式 變換시켜야 한다.

即

$$\left. \begin{aligned} J_s\ddot{\theta} + B_s\dot{\theta} + K_s\theta + J_{s1}\ddot{\phi} + K_{s1}\phi &= M_w \\ J_{s1}\ddot{\theta} + K_{s1}\theta + J_1\ddot{\phi} + B_1\dot{\phi} + K_1\phi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(1)式을 變換시키면,

$$\left. \begin{aligned} \theta &= M_w - [b_1\theta + b_2\theta + b_3\ddot{\phi} + b_4\phi] \\ \phi &= -[a_1\ddot{\phi} + a_2\dot{\phi} + a_3\theta + a_4\phi] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

이 되며 (13)式의 解를 얻기 위하여는 Fig. 12의 analog computer program에서 非線型項을 除外한 圖解로 analog computer에 넣어야 한다. 이렇게 하여 analog computer에 依해 解를 얻은 結果, Fig. 13(a)와 같으며 橫軸의 M_w 는 波高을 表示하고 step의 높이 即 波高을 漸次 크게 取하면, μ 는 同一한 狀態인 船에 對하여 커짐을 알 수 있고 Fig. 13(b)는 一周期로 끝나는 波와 急速히 와서 3,4 周期로 끝나는 波에 對한 減搖水槽를 取付하였을 때의 應答曲線으로 規則波에서는 $w/w_s=1.0$ 에서 $\mu=1.0\sim 1.5$ 를 넘지 않으나 이러한 不規則波에 關하여는 約 $\mu=3.0$ 으로 倍程度로 橫搖하고 있는 셈이 된다.

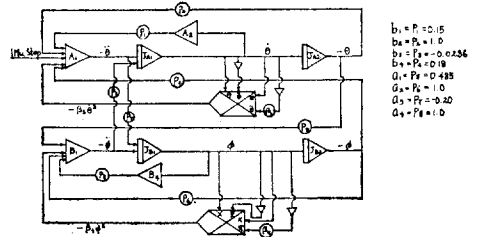


Fig. 12 Analog computer program

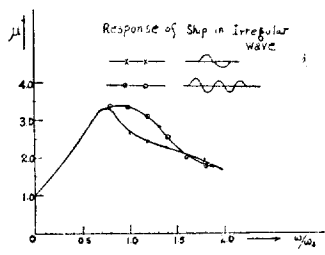


Fig. 13(a) Ship response in the step input

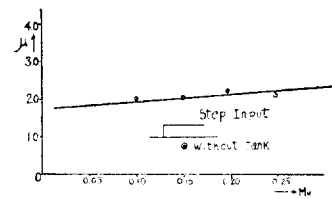


Fig. 13(b) Magnification factor of the response of ship in irregular wave as impulse wave

9. 結 論

- 1) 減搖水槽의 位置에 依한 效果는 線型範圍內에서는 높을수록 有效하나 높아질수록, 또 波의 傾斜角이 클수록 非線型項이 커져서 位相差가 同調時에는 $\pi/2$ 에서 멀어짐으로 效果가 減少된다.
- 2) Optimum damping coefficient 는 tank strength ratio 로 簡單히 表示할 수 있어서 便利하다.
- 3) 水槽內의 물이 水槽天井에 부딪혔을 때 $w/w_s=0.9$ 근처에서 水槽效果가 惡化된다.
- 4) Step input 인 경우, 波의 높이가 增加하여도 magnification factor 의 크기에는 그렇게 變化를 주지 않는다.

記 號 表

- J_s : inertia coefficient of ship
- B_s : ship damping coefficient
- K_s, a_s : coefficient of restoring force of ship
- J_t, b_t : inertia coefficient of tank
- B_t, b_t : tank damping coefficient
- K_t, b_s : coefficient of restoring force of ship
- J_{st} : coefficient of inertia coupling between ship and tank
- K_{st}, C_s : coefficient of static coupling between ship and tank
- θ : 船의 橫搖角
- ϕ : tank 內 流體의 搖角
- θ_w : 波傾斜(水)
- γ : 有效波 係數
- ω : 波의 周波數
- ω_s : 船의 固有周波數
- ω_t : tank의 固有周波數
- ω_{st} : decoupling frequency = $\sqrt{\frac{K_t}{J_{st}}}$
- t : 時間
- μ : magnification factor
- $a_s: 1 - \frac{w^2}{w_s^2}$
- $a_t: 1 - \frac{w^2}{w_t^2}$
- $a_{st}: 1 - \frac{w^2}{w_{st}^2}$
- $M_w: \gamma \theta_w \cdot W \cdot GM$
- b_s : normalized damping of ship = $\frac{B_s w}{K_s}$
- b_t : normalized damping of tank = $\frac{B_t w}{K_t}$
- λ : tank strength ratio = $\frac{K_t}{K_s}$
- $\lambda': \lambda a_{st}^2$

λ'_e : $\lambda'(1+\delta)$, effective tank strength ratio

M_t : tank moment

l : tank 의 길이

K_o : coefficient of the linear resistance for optimum stabilization

H : tank 의 높이

h, h_1 : side tank 內 流體의 높이

h_d : height connecting conduit

z : 船의 重心 G로부터 tank 까지의 높이

$\varepsilon_{m\phi\theta}$: 船의 橫搖와 tank 水의 運動間의 位相差

$\varepsilon_{m\phi\theta}$: 船의 橫搖가 tank moment 間의 位相差

M_w : wave height

g : gravity acceleration

參 考 文 獻

- 1) J.H. Chadwick and Klatter: "On the Dynamics of Anti-Rolling Tanks", *Schiffs Technik* 1954.
- 2) 禹奉九: "減搖タンクの效果について", 日本造船學會論文集 No. 126, 昭和44年
- 3) Ir, C. Stigter: "Performance of U-Tank as a Passive Anti-Rolling Tanks", Publication of the Netherlands Ship Research Center TN, 1966, Aug. Vol. 13, No 144.
- 4) 渡邊惠弘: "減搖水槽の設計に就て" 日本造船協會誌 Vol. 46 昭 5.
- 5) S.N. Blagoveschensky: "*Theory of Ship Motion*", Dover Publication, Inc. New York p.513~p.536, 1962.
- 6) F. Horn: "Partial Activation of Anti-Rolling Tanks", Proceeding Symposium on the Behaviour of Ships in a Seaway p.286, 1911.
- 7) 元良誠三: "船體運動力學" 共立社 昭 34. p.115~116.