

Anti-Rolling Tank 성능에 관하여

인하대학교 선박해양공학과
우 봉 구*, 임 병 보**

1. 일반적 법칙과 탱크의 형상

선박의 탱크내에 물이 일부분 들어 있으면 배가 횡요할 때 물의 이동으로 횡요 모멘트를 발생시키며 이것을 알맞게 조절 설계함으로써 횡요 모멘트를 감소시키도록 할 수 있다.

그림 1은 횡요 운동과 연관되어 요구되는 물의 운동을 나타내고 있으며 횡요 속도와 같은 위상이 되도록 물의 운동이 횡요 운동보다 $\pi/2$ 의 位相差로 전진하도록 해야 한다.

그림 2는 현재 사용하고 있는 수동형 탱크의 종류를 나타내고 있다. 가장 간단한

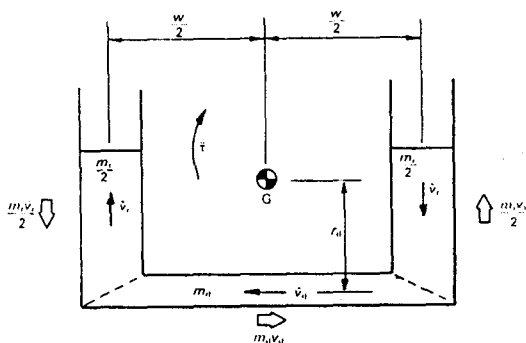


그림 1 Fluid accelerations and reactions in a passive stabilising tank.

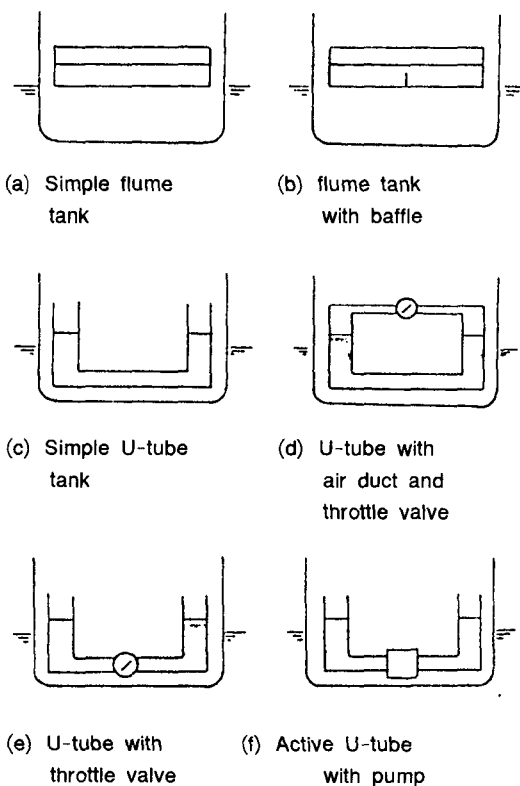


그림 2 Type of passive tank.

것은 4각 탱크를 좌우로 유동하는 플룸 혹은 자유표면탱크이고 이외에 탱크 중앙을

* 교수, 인하대학교

** 인하대학교 대학원

제한하거나 방해관을 설치하여 어떤 제한된 제어로 물의 운동에 작용되기도 한다.

U형 탱크가 여러가지 배에 부착되어 왔다. 이 경우에 양쪽 U형 탱크가 水平水路로 연결되어 있어 이 통로를 통하여 물이 이동하게 되어 있다. 두 수직 탱크는 윗쪽이 공기에 개방되어 있거나 공기관으로 연결되어 있다. 이 경우 스톨 밸브가 달려서 물의 운동을 제어하기도 한다. 어떤 설계에 있어서는 스톨 밸브나 펌프를 관에 연결하여 쓰는 수도 있다.

수동형은 느린 속도에서 잘 작동한다. 그러나 고속에서는 잘 설계된 능동형인 핀 스태빌라이저 보다는 효과가 크지는 않다. 이런 이유 때문에 수동형은 항해시의 대부분을 해상에서 작업하는데 쓰이는 해양조사선 혹은 기후관측선, 어로지도선 등에 많이 쓰인다.

탱크는 이동하는 부분이 없는 이점(펌프나, 제어용 스톨 밸브를 제어하고)이 있으며 관리 유지가 간단하다.

또한 수동형을 부착함으로써 편이나 빌지 킬이 잘못 부착하여 발생하는 저항의 증가를 피할 수 있다. 탱크는 상당한 양의 배의 용적을 차지한다.

그러나 청수창 또는 연료탱크를 사용함으로써 배의 용적손실은 그다지 문제가 되지 않으나 적당한 높이의 탱크의 위치를 차지하므로 배의 설치 위치상 곤란할 때가 종종 있다.

이 설비의 좋은 점은 자유표면 영향으로 메타센터 높이의 감소가 중요 복원력을 감소시킨다는 것이다.

2. U-tube 型 탱크의 이론

플룸탱크가 비교적 간단하지만 적당한 이론이 성립되어 있지는 않다. 그러나 스티그터 (1966)가 U-tube型 수동형에 대하여 이

론을 전개한 바 있어서 약간 수정하여 여기서 설명하기로 한다.

2.1. 탱크내 물의 운동 방정식

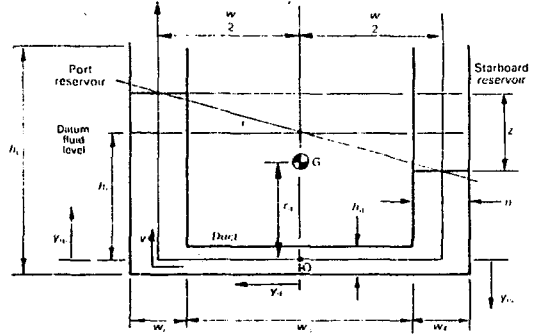


Fig 3-1. Axis system and tank dimensions

그림 3-1은 U-tube 수동형 탱크의 그림이다. 탱크는 양쪽 4각형기둥을 수평으로 수통로를 연결한 것이다. 탱크의 길이(앞뒤 방향)가 X_t 미터이다. 배-탱크의 운동 관계식은 0을 원점으로 연결관의 중앙점으로 하여 X축으로 하고 양쪽기둥의 중앙의 수직축을 y로 하여 해석한다.

+方向에서 y축방향의 유체의 속도(좌측의 윗방향)은 v m/sec이다.

추가된 세 개의 축이 정의된다: y_d 는 수평관과 평행이고 원점이 0에 있다. (좌측이 +) y_{rp} , Y_{rs} 는 주로 중심선에 원점을 갖고 양쪽 수직관 벽과 평행이다. n 은 탱크의 폭이다(y축에 수직) n 는 수로관의 h_d 와 두 개의 수직관의 w_r 의 변화에 따라 변한다는 것을 주의해야 한다.

n 방향의 흐름은 없고 탱크 중의 단위질량(1톤)의 운동은 오일러 방정식으로 나타난다고 가정한다.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} = Y - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2. 1)$$

여기서 Y는 단위질량에 작용하는 외력이
고 ρ_t 탱크내의 유체의 밀도이다.

지금 닥트와 양쪽 수직기둥은 일정한 단
면적이라고 가정하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

모서리 영향을 제외하면 (2. 1)식은 다음
과 같이 간단히 된다.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = Y - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2. 2a)$$

혹은 여기서 지금 단지 그 변수뿐이므로

$$\frac{dv}{dt} = Y - \frac{1}{\rho_t} \frac{dp}{dy} \quad (2. 2b)$$

만약 두 기둥의 물의 높이가 같지 않아
그 차가 Z m이라고 하면 각 기둥에서의 속
도는

$$v_r = \frac{d}{dt} \left(\frac{Z}{2} \right) = \frac{w\tau}{2} \text{ m/sec}$$

여기서 τ 는 탱크 경사각도이며 적다고
가정한다

$$w = w_a + w_r \text{ meters} \quad (2. 3)$$

탱크에서 임의의 점의 속도는

$$v = \frac{w_r v_r}{n} = \frac{w_r w \tau}{2n} \text{ m/sec}$$

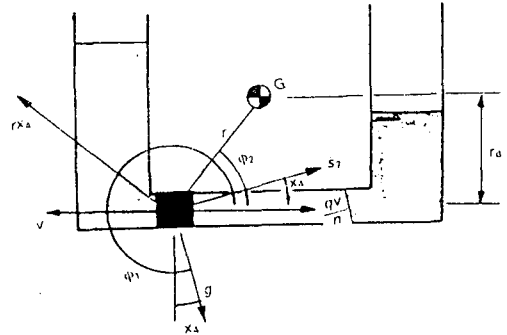
單位外力Y는 탱크에 작용하는 가속도에
기인하는 것과 스토클 밸브로 인한 소모와
마찰에 의한 손실로 인한 마찰력에 기인하
는 것이다.

Fig 3-2(a), (b)가 이것을 나타낸다.

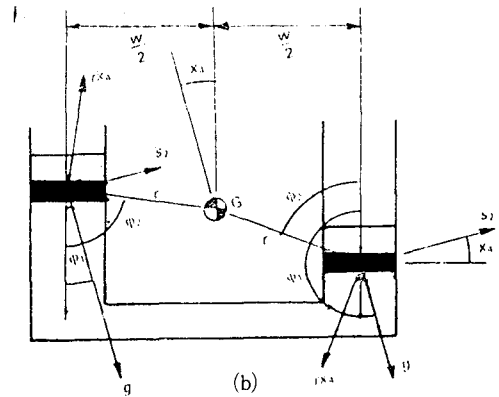
(a) y 방향에 의한 중력에 의한 가속도 성분

$$-g \cos \phi_1, \text{ m/sec}^2$$

(b) 횡요 가속도에 의한 가속도는



(a)



(b)

Fig 3-2. External forces applied to unit mass in (a) U-tube duct and (b) U-tube reservoirs

$$-r \ddot{x}_4 \cos(\phi_2 = \frac{\pi}{2}) = -r \ddot{x}_4 \sin \phi_2 \text{ m/sec}^2$$

(c) y방향의 부분적 횡방향의 가속도 성분

(1) 수로내에서

$$Y_{LA} = \ddot{s}_2 \cos \alpha_4 \approx \ddot{s}_2 \text{ m/sec}^2 \quad (2. 4a)$$

(2) 양기둥에서

$$Y_{LA} = \ddot{s}_2 \sin \alpha_4 \approx 0 \quad (2. 4b)$$

s_2 와 α_4 는 둘다 적은 양이라고 가정

(d) 마찰과 감쇄력

이들은 부분속도의 자승에 비례하지만 감
쇄는 선형적이고 속도 v 에 비례한다고 가
정하는 것이 편리하다. 만약 탱크 길이 x_1 가
 n 보다 매우 크면 단위 질량당의 마찰력은

$$\frac{-q \nu}{n} \text{ KN/ton 이다.}$$

여기서 q 는 실험에 의하여 정해지는 저항 계수이다.

식 (2. 2b)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{w r w \ddot{\tau}}{2n} + \frac{q w r w \ddot{\tau}}{2n^2} + g \cos \phi_1 + r \ddot{x}_4 \sin \phi_2 - Y_{LA} \\ = \frac{-1}{\rho_t} \frac{dp}{dy} \text{ m/sec}^2 \quad (2. 5) \end{aligned}$$

近似的으로 탱크 레벨까지 적분하여 해를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\rho_t w r w I_1 \ddot{\tau}}{2} + \frac{\rho_t q w r w I_2 \tau}{2} + \rho_t g I_3 + \rho_t I_4 \ddot{x}_4 \\ + \rho_t S_2 I_5 = P_s - P_s \text{ KN/m}^2 \quad (2. 6) \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} I_1 = \int_{\text{tank}} \frac{dy}{n} = \int_{-w/2}^{w/2} \frac{dy_d}{hd} + \int_{-hr}^0 \frac{dy_{rs}}{w_r} \\ + \int_0^{hr} \frac{dy_{rp}}{w_r} + \frac{2hr}{w_r} \quad (2. 7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2 = \int_{\text{tank}} \frac{dy}{n^2} = \int_{-w/2}^{w/2} \frac{dy_d}{h^2 d^2} + \int_{-hr}^0 \frac{dy_{rs}}{w_r^2} \\ + \int_0^{hr} \frac{dy_{rp}}{w_r^2} = \frac{w}{h^2 d^2} + \frac{2hr}{w_r^2} \quad (2. 8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_3 = \int_{\text{tank}} \cos \phi_1 dy = x_4 \int_{-w/2}^{w/2} dy_d - \int_{-hr}^0 dy_{rs} \\ + \int_0^{hr} dy_{rp} = w x_4 \text{ meter} \quad (2. 9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_4 = \int_{\text{tank}} r \sin \phi_2 dy = \int_{-w/2}^{w/2} r dy_d + \int_{-hr}^0 \frac{w}{2} dy_{rs} \\ + \int_0^{hr} \frac{w}{2} dy_{rp} = w(rd + hr) \text{ meter} \quad (2. 10) \end{aligned}$$

$$I_5 = - \int_{\text{duct}} dy = - \int_{\text{duct}} dy_d = - \int_{-w/2}^{w/2} dy_d = -w \quad (2. 11)$$

f_{tank} 는 우현 탱크의 기본선으로부터 좌현의 기본선까지 y 를 따라 적분한다. 그리고 f_{duct} 는 duct에 한한다. 각도 ϕ_1 과 ϕ_2 는 Fig 3(a)와 Fig 3(b)에서 duct와 용기에 대하여 정의한 것이다.

두 용기의 기본선에서 유체정수압은

$$P_t = -P_p = -\rho_t g \frac{w}{2} \tau \text{ KN/m}^2 \quad (2. 12)$$

대기압에 관계된다.

식 (2.6)은 탱크수에 작용하는 모멘트의 함수로서 탱크수의 운동을 주는 식으로 나타난다.

탱크모멘트는 양 탱크의 면적의 곱으로 나타난다.

$$\frac{w w_r x_t}{2} \text{ m}^3$$

이다.

$$\begin{aligned} a_{r2} \ddot{x}_2 + a_{r4} \ddot{x}_4 + c_{r4} x_4 + a_{r6} \ddot{x}_6 + a_{rr} \ddot{\tau} + b_{rr} \dot{\tau} \\ + c_{rr} \tau = 0 \quad (2. 13) \end{aligned}$$

여기서 각 계수는

$$a_{r2} = -Q_t \text{ KN-m/(rad/sec}^2) \quad (2. 14)$$

$$a_{r4} = Q_t (rd + hr) \text{ KN-m/(rad/sec}^2) \quad (2. 15)$$

$$c_{r4} = Q_t g \text{ KN-m/rad} \quad (2. 16)$$

$$\begin{aligned} a_{rr} = Q_t w r \left(\frac{w}{2hd} + \frac{hr}{w_r} \right) \text{ KN-m/(rad/sec}^2) \\ (2. 17) \end{aligned}$$

$$b_{rr} = Q_t q w r \left(\frac{w}{2hd} + \frac{hr}{w_r} \right) \text{ KN-m/(rad/sec)} \quad (2. 18)$$

$$c_{rr} = Q_t g = c_{r4} \text{ KN-m/rad} \quad (2. 19)$$

$$Q_t = \frac{\rho_t w_r w^2 x_t}{2} \text{ ton-m} \quad (2. 20)$$

2.2 수동형 탱크의 배-탱크 운동방정식

$$\begin{aligned} \text{Sway: } (m + a_{22}) \ddot{x}_2 + b_{22} \dot{x}_2 + a_{24} \ddot{x}_4 + b_{24} \dot{x}_4 + a_{26} \ddot{x}_6 \\ + b_{26} \dot{x}_6 + c_{26} x_6 + a_{2r} \ddot{\tau} = F w_{20} \sin(\omega t + r_2) \text{ KN} \quad (2. 21) \end{aligned}$$

$$\text{Roll; } a_{42}\ddot{x}_2 + b_{42}\dot{x}_2 + (I_{44} + a_{44})\ddot{x}_4 + b_{44}\dot{x}_4 + c_{44}x_4 + a_{46}\ddot{x}_6 + b_{46}\dot{x}_6 + c_{46}x_6 - [a_{4r}\ddot{\tau} + C_{4r}\tau] = Fw_{40}\sin(\omega_{et} + r_4) \text{ KN-m} \quad (2. 22)$$

4각 팔호내의 표시는 탱크 안정 모멘트이다.

$$\text{Yaw; } a_{62}\ddot{x}_2 + b_{62}\dot{x}_2 + a_{64}\ddot{x}_4 + b_{64}\dot{x}_4 + (I_{66} + a_{66})\ddot{x}_6 + b_{66}\dot{x}_6 + c_{66}x_6 + a_{6r}\tau = Fw_{60}\sin(\omega_{et} + r_6) \text{ KN-m} \quad (2. 23)$$

여기서 탱크의 가속도 계수 a_{2r} , a_{4r} , a_{6r} 를 유도 할 수 있다. 이들은 동요, 횡요, 선수요 모멘트로서 탱크각의 가속도 $\ddot{\tau} = 1 \text{ rad/sec}^2$ 이 유지되어야 한다.

그림4의 탱크를 참고해서 탱크 각가속도가 $\tau \text{ rad/sec}^2$ 이고 탱크 닥트와 용기내의 물의 가속도는 (5)식에 의하여

$$v_r = \frac{w\ddot{\tau}}{2}, \quad v_d = \frac{w_r w \ddot{\tau}}{2h_d} \text{ m/sec}^2$$

그리고 닥트와 용기중의 물의 질량은

$$m_r = 2\rho h_r w_r x_r, \quad m_d = \rho_r w h_d x_d \text{ tones}$$

시계침 방향 (양)의 가속도는

$$a_{2r}\ddot{\tau} = m_d v_d = \frac{\rho_r w_r w^2 x_r \ddot{\tau}}{2} \text{ KN}$$

그러므로

$$a_{2r} = Q_r = -a_{r2} \text{ KN/(rad/sec}^2) \quad (2. 24)$$

만약 탱크가 중심보다 전방 x_{B1} 의 위치에 놓여 있으면 가속도를 유지하기 위한 선수요 모멘트는

$$a_{6r}\ddot{\tau} = x_{B1} a_{2r} \ddot{\tau} \text{ KN-m} \quad \text{우현으로}$$

따라서

$$a_{6r}\tau = Q_r x_{B1} = a_{r6} \text{ KN m/(rad/sec}^2) \quad (2. 25)$$

용기속의 유체의 가속도를 유지하기 위한

횡요 모멘트는

$$\frac{m_r v_r w}{2} = \frac{\rho_r h_r w_r w^2 x_r \ddot{\tau}}{2} \text{ KN-m 좌현으로}$$

작용하고

그리고 닥트내의 물의 가속도를 유지하기 위한 횡요 모멘트는

$$m_d v_d w_r = \frac{\rho_r r_d w_r w^2 x_d \ddot{\tau}}{2} \text{ KN-m 좌현으로}$$

작용하고

따라서

전 횡요 모멘트는

$$a_{4r}\ddot{\tau} = \frac{\rho_r w_r w^2 x_r (h_r + r_d) \ddot{\tau}}{2} \text{ KN-m 좌현으로}$$

작용하고

다음식을 얻는다.

$$a_{4r} = Q_r (h_r + r_d) = a_{r4} \text{ KN-m/(rad/sec}^2) \quad (2. 26)$$

탱크의 각도 τ 가 유지되기 위하여 요구되는 모멘트를 고려하면 계수 C_{4r} 를 얻을 수 있다.

그림 4에서 좌현의 용기의 물의 무게는

$$\frac{\rho_r g w_r w r \tau}{2} \text{ KN}$$

이고 같은 무게가 우현측에서 감소된다. 그래서 작용하는 모멘트는

$$C_{4r}\tau = \frac{\rho_r g w_r w^2 x_r \tau}{2} \text{ KN-m/rad} \text{ 가 좌현으로}$$

작용하고

$$C_{4r}\tau = Q_r g = C_{r4} = C_{r4} \text{ KN-m/rad}$$

$$(2. 27)$$

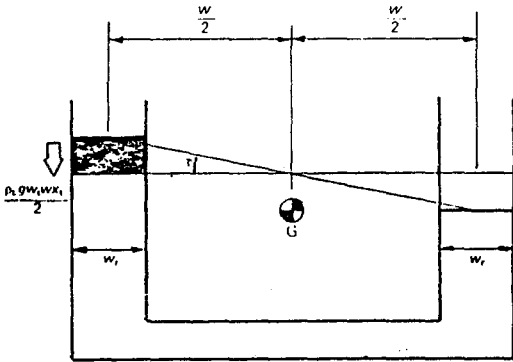


그림 4 - Roll moment due to tank angle.

3. 수동형 탱크의 설계

3.1 기본적 요구사항

그림 5는 수동형 선체 안정화탱크의 블록도이다. 적당한 탱크의 기본요건은 능동형인 편 안정화 장치와 똑같다.

탱크에 의한 안정 모멘트가 파에 의하여 발생하는 횡요 여기 모멘트와 반대가 되도록 오픈 루프가 영이 되도록 해야 한다.

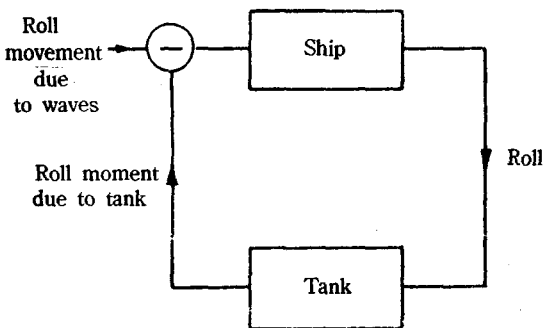


그림 5 - Block diagram for a ship with a passive stabiliser tank.

우리는 모든 주파수 범위에서 이 요구되는 조건을 다 만족시킬 수는 없으므로 가장 횡요운동이 심한 배의 고유주기에서만 이 조건을 만족시킬 수 있으면 된다.

고유주기에서 횡요운동은 파의 여기보다 $\frac{\pi}{2}$ 위상차가 생긴다. 그러므로 안정화 모멘트가 $\frac{\pi}{2}$ (고유주기에서) 먼저 발생하게 해주면 된다. 그리고 안정 모멘트가 고유주기에 최대가 되도록 해야 한다.

식 (2, 13), (2, 14)를 사용하여 탱크에 의한 모멘트가 계산된다.

Sway와 Yawing 가속도를 무시하면 그 식은 매우 간단하여진다. 여기서 배가 규칙파 중에서 횡요하고 있다고 가정하고 다음 식으로 나타내면

$$x_1 = x_{10} \sin(\omega_e t) \text{ radian}$$

이로 인한 탱크 모멘트는

$$\tau = \tau_0 \sin(\omega_e t + \epsilon_{11}) \text{ rad}$$

배에 작용하는 안정 모멘트는

$$F_{110} = F_{110} \sin(\omega_e t + \epsilon_{12}) \text{ KN-m}$$

이들은 (2. 13), (2. 14)식에 대입하면 탱크 모멘트는

$$\begin{aligned} \frac{F_{110}}{x_{10}} &= \frac{(C_{\tau 1} - \omega_e^2 a_{\tau 1})^2}{\sqrt{[(C_{\tau \tau} - \omega_e^2 a_{\tau \tau})^2 + b_{\tau \tau}^2 \omega_e^2]}} \\ &= \frac{Q_1 g (1 - a_{\tau 1} / Q_1 g)^2}{\sqrt{[(1 - \Lambda^2)^2 + 4y_1^2 \Lambda^2]}} \text{ KN-m/rad} \end{aligned} \quad (2. 28)$$

위상차는 다음과 같다.

$$\tan \epsilon_{12} = \tan \epsilon_{11} = \frac{-b_{\tau \tau} \omega_e}{C_{\tau \tau} - \omega_e^2 a_{\tau \tau}} = \frac{-2y_1}{1 - \Lambda^2} \quad (2. 29)$$

탱크 모멘트는 항상 탱크 운동과 위상이 일치하다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 탱크 안정모멘트와 위상차 곡선을 나타낸다.

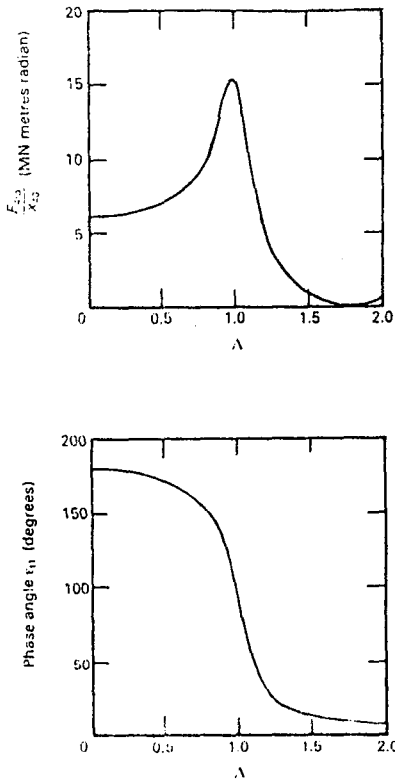


그림 6 - Tank stabilising moment characteristics.

그림을 참조하면 탱크모멘트는 탱크고유주기 근처에서 최대가 되고 이 주기에서 위상차는

$$\epsilon_{01} = 90^\circ$$

임을 알 수 있다.

탱크의 고유주기와 배의 고유주기가 같을 때 최대의 효과가 있음을 알 수 있다.

3.2 탱크 촌법의 탱크 고유주기에서 미치는 영향

탱크의 고유주기는 탱크 촌법, h_d , w , w_r 및 h_r 의 영향을 받는다.

이 영향 인자를 고려한 것을 그림 7에 나타내고 있다. 이 그래프는 초기탱크 설계에 대한 것이다.

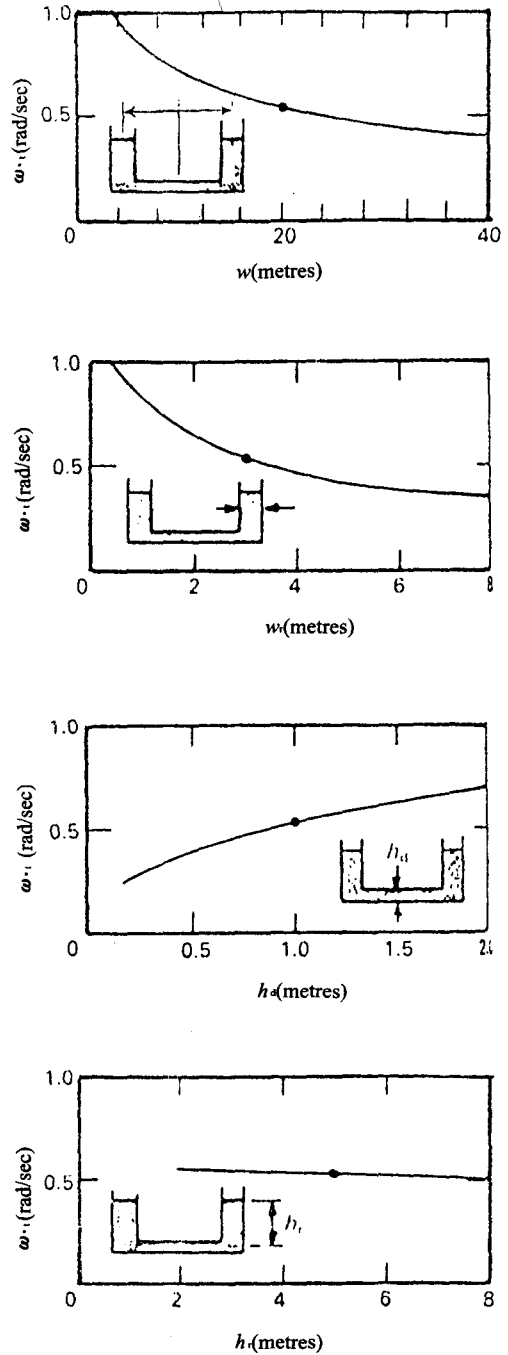


그림 7 - Effect of tank dimensions on tank natural frequency

탱크 고유 주파수는 w 및 w_r 에 따라 감소하고 닻크 깊이 h_d 에 따라 증가한다.

고유주기는 h_r 에 대하여는 그다지 민감하게 변하지 않는다. 그러므로 일단 설계가 끝나거나, 배에 탱크를 부착한 후에는 그 변화의 범위가 한정되어 있다.

3.3 물의 깊이와 최대 탱크각

실제로는 h_r 은 닻크의 기본높이로부터 탱크 수면높이로 정하며 이것은 가장 큰유체의 운동과 안정 모멘트를 발생시킨다.

최대 탱크 각은 다음과 같다.

$$\tan \tau_{max} = \frac{h_r - h_d}{w} \quad (2. 30)$$

3.4 최대 안정 모멘트

고유 진동수에서 발생하는 안정 모멘트는

$$\Lambda = 1$$

로 놓으면 얻을 수 있다.

식 (2, 28)에 의하면

$$\frac{F_{40}}{x_{40}} = Q_0 g \frac{[1 - a \cdot \sqrt{(Q_0 g)}]^2}{2 y_1} \text{ KN m/rad} \quad (2. 31)$$

탱크의 고유주기는 탱크의 촌범 w , w_r 및 h_d 로 연결된다는 것을 알고 있다. 따라서 요

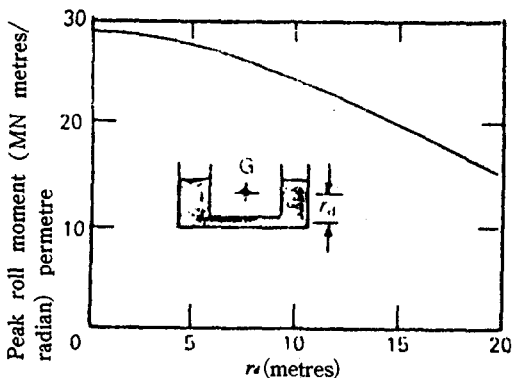


그림 8 - Effect of tank location on peak stabilising moment

구되는 최대 안정모멘트는 나머지 인자 ρ , x_i , y_i 및 r_d 에 의하여 결정된다.

안정모멘트는 유체 밀도 ρ 및 탱크 길이 x_i 가 커지면 커지게 된다.

그림 8은 탱크 길이와 닻크의 C, G 로 부터의 위치에 따른 최대모멘트의 변화를 나타낸다.

이것은 탱크가 배의 높은 곳에 위치할수록 효과가 크다는 것을 나타낸다. (즉 r_d 가 적다)

3.5 메타센터 높이의 감소

수동형 안정화 탱크의 결점은 자유표면의 영향에 의한 횡요 복원력의 감소에 있다. 배가 영의 주파수에서의 횡요운동을 생각해보면 다음과 같다.

$$C_u x_4 - C_s \tau = F_s \text{ KN} - m$$

따라서

$$mg \overline{GM} (1 - \mu) x_4 = F_s \text{ KN} - m$$

μ 는 메타센터 높이 손실이다.

$$\mu = \frac{Q_1}{m \overline{GM}_L} \quad (2. 32)$$

이 손실은 바람직하지 않으며 μ 는 보통 0.25 이내로 한정되어 있다.

3.6 유동수의 질량

유동수 질량은 다음 식과 같다.

$$m_i = \rho x (whd + 2h \cdot w) \text{ ton} \quad (2. 33)$$

가장 만족스러운 안정화 정도는 m_i 가 배의 배수량의 1~5% 정도이다.

3.7 탱크 뎀핑

그림 1에서와 같이 탱크의 뎀핑은 스토틀

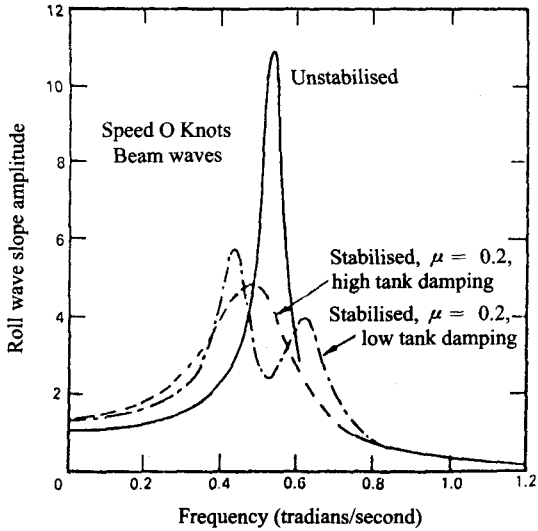


그림 9 - Typical roll transfer functions showing effect of passive tank damping.

밸브로 그 목적을 달성할 수 있다. 그림 9는 배가 정지상태에서 탱크 댐핑 계수의 증가에 따른 빔웨이브에서 배의 횡요운동 전달 함수에 대한 영향을 나타내고 있다.

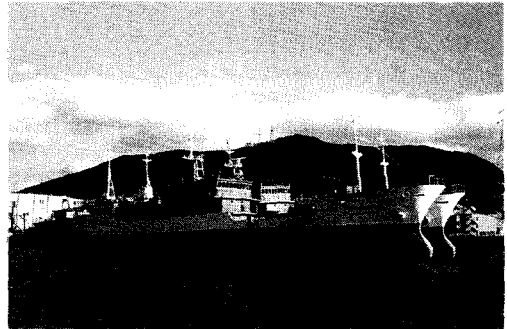
탱크 댐핑 계수가 적으면 횡요 고유주기에서는 효과가 가장 크다. 그러나 기타의

저주파수나 고주파수에서 피크가 커진다.

이것은 그러한 주파수에서는 배의 운동을 크게 한다는 것을 의미하며 이것은 댐핑을 크게 해주면 없어지거나 감소된다.

3.8 결 론

적당히 잘 설계된 수동형탱크의 효과는 70~80%의 감소효과가 있으며 특히 배가 정지해 있을 때 빔웨이브에서는 효과가 특히 좋다. 그러나 폴로잉웨이브 등에 있어서는 한쪽으로 경사되어 그 효과가 거의 없으므로 이때는 자동경사제어 시스템으로 하는 것이 바람직스럽다.



질서있는 생활속에
보존되는 자연환경