

流動貨物の有効自由表面에 관한 研究

許 逸* · 王 之 錫**

A Study on the Effective Free Surface of Fluid Cargo

I. Hur · J. S. Wang

〈 目 次 〉

Abstract	3. 탱크 메타센터 位置의 近似計算式
記號說明	4. 近似計算式의 誤差
1. 序 論	5. 結 論
2. 탱크 메타센터 位置의 計算式	參考文獻

Abstract

It is well known that the height of tank metacenter above the centroid of fluid in a tank is given by i/v where i is the inertia moment of free surface and v is the fluid volume. It is supposed in this formula that the inclination of ship is small and that the free surface of fluid do not touch the top and the bottom of tank. If the inclination of ship is large, the height of tank metacenter may be possibly greater than that given by i/v . The height of tank metacenter is smaller than i/v when the free surface of fluid touch the top or the bottom of tank.

The reasonable method to calculate the height of tank metacenter is presented in this paper and prepared in FORTRAN program by FUNCTION EFFRES. The approximate formula was also developed and given by

$$g_m = \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \theta\right) \left[1 - \text{EXP}\left\{-12 \left(\frac{\alpha(1-\alpha)k}{\tan \theta}\right)^{1.05}\right\}\right] \frac{i}{v}$$

where g_m is the distance from the centroid of fluid to the tank metacenter, θ is inclined angle of ship, α is the ratio of filled volume to tank capacity and k is the ratio of the depth to the width of tank.

The values calculated by the approximate formula given in this paper were compared with the exact values from the computer program and proved out to be sufficiently precise for practical use.

* 正會員, 韓國海洋大學

** 韓國海洋大學

記 號 說 明

- i : 自由表面의 圖心을 지나는 縱方向軸에 관한 2次 모우멘트
 v : 탱크에 積載된 液體의 容積
 γ : 탱크에 積載된 液體의 比重量
 w : 탱크에 積載된 液體의 重量
 θ : 배의 傾斜角度
 W : 배의 重量
 α : 탱크에 積載된 液體의 容積과 탱크 容量과의 比
 b : 탱크의 幅
 h : 탱크의 깊이
 k : 탱크의 깊이와 幅의 比(h/b)
 g_m : 直立液體 重心으로부터 탱크 메타센터까지의 거리
 φ_1 : 第一臨界角
 φ_2 : 第二臨界角
 F_h : 有効自由表面 效果를 일기 위하여 i 에 곱해 주어야 하는 係數
 P_1, P_2, P_3, P_4 : 파라미터
 ΔA : 복원 아암의 減少量

1. 序 論

流動貨物을 運送하는 배에서 貨物이 運送途中 膨脹하여 넘치는 것을 防止하기 위하여 탱크容 量의 95~98%만 채운다. 따라서 自由表面이 생 기게 되고 탱크속의 液體運動이 배의 복원아암 을 減少시킨다는 것은 잘 알려진 事實이다. 流動貨物을 運送하는 배가 아니더라도, 모든 배는 燃料油, 淸水, 물벨러스트 等 液體를 싣고 다니 기 때문에 程度의 差異는 있으나 自由表面에 의 한 복원아암의 減少가 있다.

自由表面에 의한 복원아암 減少量을 計算하는 通常의인 方法은 배의 直立狀態에서 液體의 重心으로부터 위로 i/v 의 거리에 位置한 탱크 메타센터에서 탱크속 液體의 重量이 作用한다고 看做한다. 여기서 i 는 自由表面의 圖心을 지나 는 縱方向軸에 관한 2次 모우멘트이고 v 는 液體의 容積이다. 따라서 液體의 比重量을 γ , 배의 무게를 W 라 하면 배가 θ 만큼 傾斜되었을 때 $\gamma i \sin \theta / W$ 만큼 복원아암이 減少한다.

복원아암의 減少量을 計算하는 上記의 方法은

다음과 같은 2가지 問題點을 包含하고 있다. 첫째는 배의 傾斜角度가 작아야 한다는 것이다. 탱크메타센터의 位置를 決定하는 式 i/v 는 배의 傾斜角度가 작아야 成立하고 傾斜角度가 크면 맞지 않는다. 그런데 배의 傾斜角度가 작을 때 는 위험한 것이 아니므로 복원아암의 減少가 問題되지 않는다. 복원아암의 減少가 징각 問題되 는 것은 배의 傾斜角度가 클 때이다. 배의 傾斜 角度가 커질수록 탱크메타센터의 높이가 i/v 로 計算되는 값보다 작아진다면, 自由表面에 의한 복원아암을 計算하는 通常의인 方法에 問題가 없을 것이다. 그런데 배의 傾斜角度가 커질수록 탱크메타센터의 높이가 i/v 로 計算되는 값보다 커진다면 탱크메타센터의 높이를 i/v 로만 計算 하여서는 위험할 可能性이 있다. 特히 탱크幅에 比하여 깊이가 깊은 탱크가 절반쯤 채워져 있을 때 더욱 그러하다.

둘째는 탱크 天頂이 液體의 自由表面에 닿지 않아야 하고 탱크 바닥이 自由表面에 露出되지 않아야 한다. 그러나 실제로는 배가 어느 程度 기울면 탱크 天頂이 自由表面에 닿기도 하고 바 닥이 露出되기도 한다. 그리되면 탱크 메타센터

의 높이는 i/v 로 計算된 값보다 작아지고 복원 아암의 減少도 작아진다. 그러므로 自由表面의 影響을 計算하는 慣例의인 方式에서는 모든 탱크는 完全히 비어 있거나 完全히 채워져 있다고 看做하고(단 기름탱크의 경우에는 95% 또는 98% 채워져 있다고 본다), 다만 清水系統, 燃料油系統, 물벨러스트系統, 貨物油系統等 各系統에서 가장 큰 탱크(또는 그들이 쌓으로 되어 있으면 가장 큰 탱크의 한 쌍)가 반쯤 차 있다고 가정하고, 50%, 95%, 98% 채워져 있는 탱크의 自由表面效果를 計算하는 係數를 傾斜角度에 따라 表로 만들어 使用하고 있다.

船舶을 運航하다 보면 배의 縱強度도 考慮하고 트림도 만들고, 橫傾斜角도 바로 잡는 등의 조건을 맞추다 보면 모든 탱크를 50%, 95% 또는 98% 되게 채울 수는 없고 60%~90% 또는 10%~40% 채우고 航海하지 않을 수 없는 境遇도 생길 것이다. 더구나 表를 備置하고 다니는 것도 不便하다. 따라서 배의 傾斜角度가 크든 작든, 탱크 天頂이나 바닥이 自由表面에 닿든지 안닿든지, 탱크에 채워진 양이 얼마이든, 모든 境遇에 대하여 自由表面效果를 正確하게 計算할 수 있는 式이 있다면 대단히 便利할 것이다.

本 研究에서는 탱크를 幅이 b 이고 長이가 h 인 直六面體라고 看做하고(長이는 얼마이든 相關없다) 모든 境遇에 대하여 탱크 메타센터의 높이를 正確하게 計算할 수 있는 式을 提示하였다. 즉 正確한 有効自由表面效果를 計算하기 위하여, 自由表面의 圖心을 지나는 縱方向 軸에 관한 2次 모우멘트 i 에 곱하여 주어야 하는 係數를 定義하고 이 係數를 計算하는 式을 만들었다. 배가 任意의 角度 傾斜하였을 때 탱크內 液體의 重心이 移動하는 距離를 追跡하여 여기서 鉛直線을 올려 탱크 메타센터를 구한 다음 이 係數를 計算하였다. 또한 이 係數를 計算하는 FORTRAN 프로그램을 Function으로 作成하여 提示하였다.

本 研究에서 定義한 係數의 計算式이 대단히 복잡하여 電子計算機를 備置하고 있지 않으면 利用하기가 不便한 감이 있으므로 이 係數의 近似計算式을 만들어 比較的 簡單하게 計算할 수

있도록 하였다. 그리하여 實務에서는 주어진 條件(배의 傾斜角度, 탱크의 長이와 幅의 比, 탱크의 積載量)만 있으면 이들을 單純히 代入하므로써 탱크 메타센터의 높이를 計算할 수 있게 하였다. 또한 本 近似計算式의 誤差를 알 수 있도록 하기 위하여 여러가지 境遇에 대하여 참값과 近似값을 그래프로 比較하여 놓았다.

2. 탱크 메타센터 位置의 計算式

만재되지 않은 탱크를 가진 배가 任意의 角度 θ 만큼 서서히 傾斜되었을 때 탱크속의 液體의 重心이 移動하는 距離를 正確히 計算하므로써 直立 液體重心(배의 傾斜角이 0일 때의 液體重心)으로부터 탱크메타센터 높이까지의 距離 g_m 을 求할 수 있다. 여기서 배가 서서히 傾斜되었으므로 탱크內 液體의 動的效果는 無視한다. 탱크의 形態를 幅이 b 이고 長이가 h 인 直六面體라 하고 탱크의 사운딩치가 αh 되도록 채워져 있다고 한다. 여기서 α 는 0.5 이상 즉 50% 이상 채워져 있다고 看做하고, α 가 0.5 미만 즉 50% 미만 채워져 있는 탱크에 대하여서는 後述할 것이다.

배가 어느 程度 기울면 Fig. 1-a에 보이는 바와 같이 탱크 天頂이 液體의 自由表面에 닿기 始作하는데 이때의 傾斜角度를 第一臨界角(The first critical angle) φ_1 이라 하고, 배가 더 기울면 Fig. 1-b와 같이 탱크 바닥이 液體의 自由表面에 露出되기 始作하는데 이 때의 배의 傾斜角度를 第二臨界角(The second critical angle) φ_2 라 하면 簡單한 計算으로부터 φ_1, φ_2 를 다음과 같이 求할 수 있다.

$$\varphi_1 = \tan^{-1} 2(1-\alpha)k, \quad 0 \leq \varphi_1 \leq \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \frac{k}{2(1-\alpha)}, \quad 0 \leq \varphi_2 \leq \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

여기서 k 는 탱크 長이와 幅의 比로서 h/b 이다. α 가 0.5 이상이기 때문에 $\varphi_1 \leq \varphi_2$ 이다. Fig. 2와 Fig. 3는 가로軸을 k 로 잡고 α 를 파라미터로 하여 各各 臨界角 φ_1 과 φ_2 의 값을 나타낸다. 예상하였던 대로 탱크의 長이와 幅의 比 k 가 클수록 臨界角은 커짐을 알 수 있다.

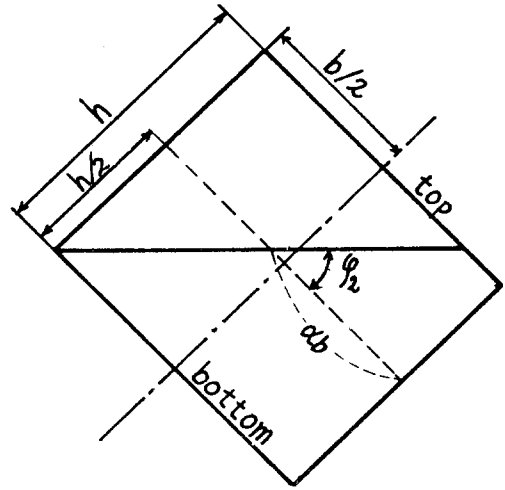
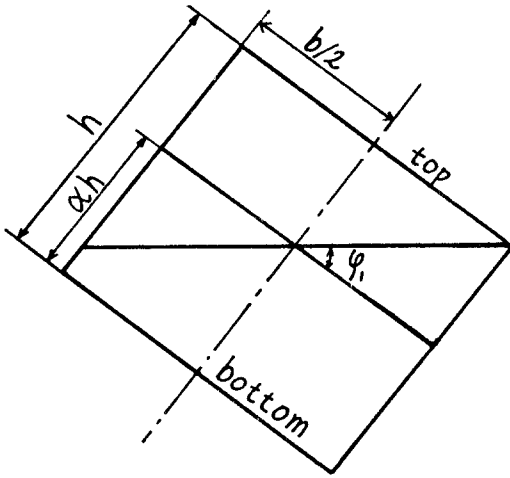


Fig. 1-a. The first critical angle

Fig 1-b. The second critical angle

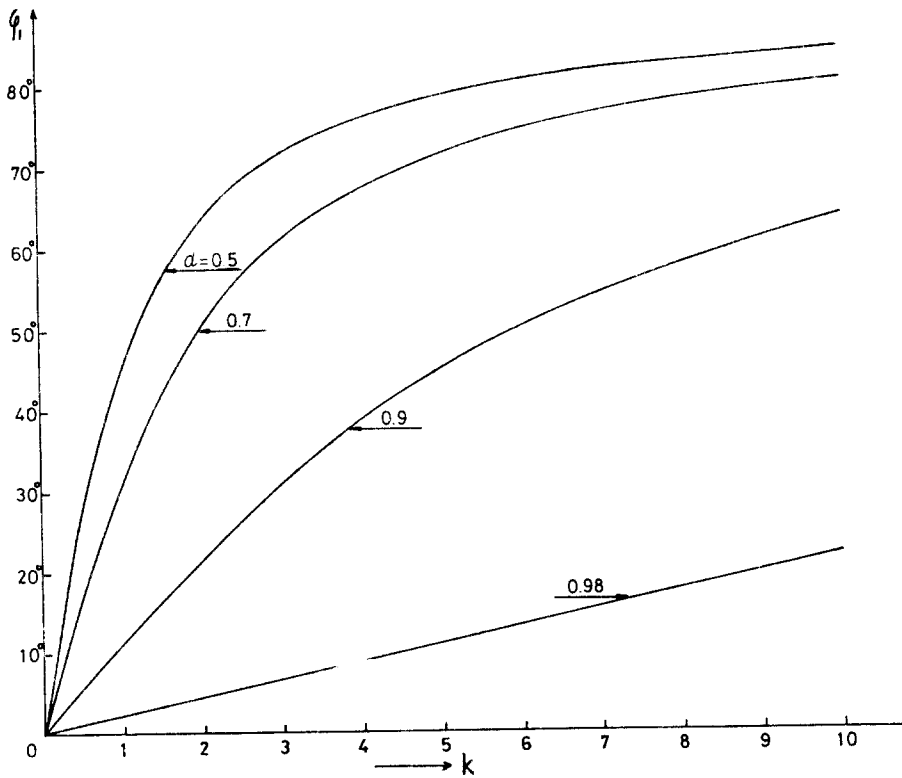


Fig. 2. The first critical angle ϕ_1

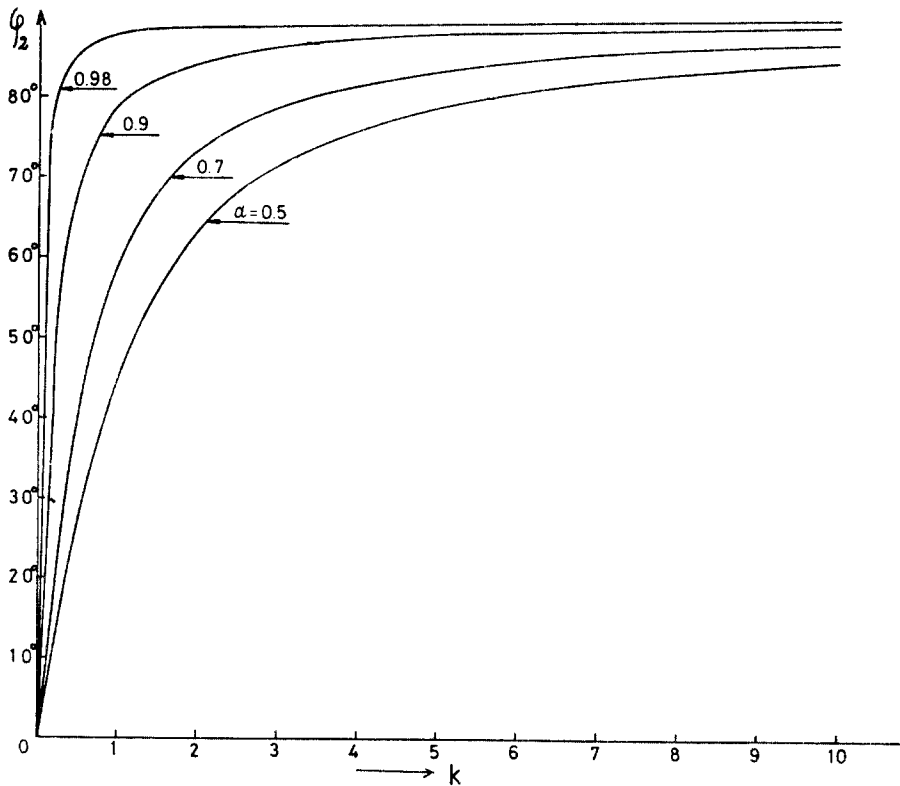


Fig. 3. The second critical angle φ_2

液體自由表面의 圖心을 지나는 從方向軸에 관한 2차 도우멘트를 i , 液體의 容積을 v 라 하면, 直立 탱크의 液體重心으로부터 탱크 메타센터까지의 거리 g_m 은 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$g_m = F_h \frac{i}{v} \quad (3)$$

여기서 F_h 는 배의 傾斜角度 θ 와 k 및 α 의 함수로서 有効自由表面 效果를 얻기 위하여 i 에 곱해주어야 할 係數(Factor)이다.

復雜한 數學的 計算을 通하여 F_h 를 구하면 다음과 같다.

① $\theta \leq \varphi_1$ 일 때

$$F_h = 1 + 0.5 \tan^2 \theta \quad (4)$$

式(4)에서 보는 바와 같이 배의 傾斜角度 θ 가 작을 때는 $F_h \approx 1$ 이 되어 $g_m = i/v$ 가 되고 보통 實務에서 計算하는 탱크 메타센터의 높이가 된다. 그러나 배의 傾斜角度가 작을 때는 위험하

지 않기 때문에 이런것이 別로 問題되지 않고, 장국 問題가 되는 것은 傾斜角度가 클 때이다.

그런데 式(4)에서 보는 바와 같이 θ 가 클 때에는 F_h 가 1보다 크고, 따라서 g_m 을 i/v 로만 잡아서 G.M을 計算하고 복원정 및 복원 모우멘트를 구한다면, 이들이 實際보다 크게 計算되어 위험할 소지가 있다. 特히 φ_1 이 클 때 즉 k 가 크고 α 가 0.5에 가까울 때 더욱 그러함을 알 수 있고 流動貨物 專用船의 境遇에는 留意할 必要가 있다.

② $\varphi_1 < \theta \leq \varphi_2$ 일 때

$$F_h = k(1-\alpha)(2-P_1) \left\{ \frac{2P_1+3P_2}{\tan \theta} + P_1 \left(1 - \frac{1}{2} P_1 \right) \tan \theta + k(1-\alpha) + 3P_3 \right\} \quad (5)$$

여기서

$$P_1 = \sqrt{\frac{2k(1-\alpha)}{\tan \theta}}$$

$$P_2 = \frac{2(1-P_1)(P_1^3/3 - P_1 + 1)}{(2-P_1)^3}$$

$$P_3 = \frac{2k(1-\alpha)(1-P_1)}{3(2-P_1)^3}$$

③ $\theta > \varphi_2$ 일 때

$$F_h = \alpha k \left(\frac{\alpha k - k}{2 \tan \theta} + 1 - \alpha \right)$$

$$\left(\frac{8k}{\tan^2 \theta} + \frac{P_1 + P_3}{\tan \theta} + 4k + P_2 + P_4 \right) \quad (6)$$

여기서

$$P_1 = \frac{2 \tan \theta - k/\alpha}{2 \tan \theta - k} \left\{ 6\alpha + \frac{(1-4\alpha)k}{\tan \theta} \right\}$$

$$P_2 = 2(1-\alpha)k \frac{2 \tan \theta - k/\alpha}{2 \tan \theta - k}$$

$$P_3 = \frac{2 \tan \theta - k/(1-\alpha)}{2 \tan \theta - k} \left\{ 6(1-\alpha) + \frac{(4\alpha-3)k}{\tan \theta} \right\}$$

$$P_4 = 2\alpha k \frac{2 \tan \theta - k/(1-\alpha)}{2 \tan \theta - k}$$

以上은 α 가 0.5 이상일 때만 適用되는데 α 가 0.5 미만일 때는 α 대신에 $1-\alpha$ 를 代入하면 된다. 예를 들면 35% 채워져 있는 탱크의 F_h 는 65% 채워져 있는 탱크의 F_h 와 같다.

有効自由表面效果를 얻기 위하여 i 에 곱하여 주어야 하는 係數 F_h 는 前述한 바와 같이 배의 傾斜角度(θ), 탱크 깊이와 幅의 比(k) 및 탱크에 채워진 量(α)의 함수인데 이를 計算하는 FORTRAN 프로그램을 FUNCTION EFFRES로 作成하여 부록에 첨부하여 놓았다.

Table 1, 2, 3, 4, 5는 各各 50%, 70%, 90%, 95%, 98% 채워진 탱크에 대하여 F_h 의 값들을 나타낸 것이다. 表에서 보는 바와 같이 F_h 의 값이 1보다 큰 경우가 러다히 많다는 것을 알 수 있다. 예를 들면 70% 채워진 탱크의 경우 $k=1$ 일 때 25° 기울면 11% 커지고 35° 기울면 22%나 커진다.

Table 1. The values of F_h for the tank filled 50%

k \ $\theta(^{\circ})$	10.	20.	30.	40.	50.	60.	70.	80.
.10	.769	.414	.270	.192	.140	.101	.069	.041
.15	.983	.608	.409	.295	.219	.161	.114	.073
.20	1.016	.779	.545	.401	.303	.228	.166	.111
.25	1.016	.919	.676	.509	.391	.300	.224	.157
.30	1.016	1.017	.798	.616	.482	.377	.288	.210
.40	1.016	1.066	1.002	.825	.671	.543	.434	.334
.50	1.016	1.066	1.133	1.014	.863	.724	.599	.485
.60	1.016	1.066	1.167	1.172	1.050	.914	.784	.660
.70	1.016	1.066	1.167	1.287	1.227	1.110	.984	.859
.80	1.016	1.066	1.167	1.347	1.336	1.308	1.423	1.323
.90	1.016	1.066	1.167	1.352	1.521	1.503	1.423	1.323
1.00	1.016	1.066	1.167	1.352	1.624	1.692	1.658	1.585
1.10	1.016	1.066	1.167	1.352	1.689	1.871	1.899	1.868
1.20	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.035	2.145	2.168
1.30	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.181	2.392	2.485
1.40	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.304	2.639	2.819
1.50	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.401	2.884	3.167
2.00	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	3.987	5.096
2.50	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.676	7.236
3.00	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.774	9.459
3.50	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.774	11.623
4.00	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.774	13.598
4.50	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.774	15.246
5.00	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.774	16.439

Table 2. The values of F_h for the tank filled 70%

$k \backslash \theta(^{\circ})$	10.	20.	30.	40.	50.	60.	70.	80.
.10	.630	.346	.227	.161	.117	.085	.058	.035
.15	.812	.503	.341	.247	.183	.135	.096	.061
.20	.932	.638	.452	.334	.253	.191	.139	.093
.25	.998	.744	.557	.422	.325	.250	.187	.131
.30	1.016	.832	.651	.509	.400	.313	.241	.175
.40	1.016	.963	.803	.672	.552	.449	.360	.279
.50	1.016	1.039	.924	.811	.702	.595	.496	.404
.60	1.016	1.066	1.020	.926	.843	.745	.645	.548
.70	1.016	1.066	1.091	1.027	.968	.896	.803	.712
.80	1.016	1.066	1.138	1.114	1.078	1.043	.975	.892
.90	1.016	1.066	1.162	1.188	1.178	1.184	1.150	1.090
1.00	1.016	1.066	1.167	1.247	1.271	1.314	1.331	1.303
1.10	1.016	1.066	1.167	1.293	1.354	1.431	1.513	1.531
1.20	1.016	1.066	1.167	1.326	1.430	1.542	1.694	1.772
1.30	1.016	1.066	1.167	1.346	1.496	1.647	1.873	2.025
1.40	1.016	1.066	1.167	1.352	1.554	1.747	2.047	2.289
1.50	1.016	1.066	1.167	1.352	1.602	1.842	2.213	2.564
2.00	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.225	2.931	4.052
2.50	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.447	3.546	5.632
3.00	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.051	7.172
3.50	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.430	8.540
4.00	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.673	9.789
4.50	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.772	10.967
5.00	1.016	1.066	1.167	1.352	1.710	2.500	4.774	12.066

Table 3. The values of F_h for the tank filled 90%

$k \backslash \theta(^{\circ})$	10.	20.	30.	40.	50.	60.	70.	80.
.10	.266	.142	.095	.068	.050	.036	.025	.015
.15	.373	.205	.139	.102	.076	.057	.040	.026
.20	.469	.264	.181	.134	.103	.079	.058	.039
.25	.554	.320	.222	.166	.129	.101	.077	.055
.30	.631	.373	.262	.198	.155	.124	.097	.072
.40	.759	.471	.337	.259	.206	.169	.140	.113
.50	.859	.559	.409	.318	.257	.214	.185	.160
.60	.932	.639	.476	.375	.307	.259	.229	.213
.70	.982	.711	.539	.431	.357	.305	.274	.270
.80	1.009	.775	.598	.484	.406	.351	.320	.330
.90	1.016	.832	.655	.536	.454	.397	.368	.393
1.00	1.016	.882	.707	.586	.501	.443	.416	.456
1.10	1.016	.925	.757	.635	.548	.490	.464	.520
1.20	1.016	.963	.803	.681	.594	.536	.514	.583
1.30	1.016	.994	.847	.726	.639	.582	.564	.648
1.40	1.016	1.020	.887	.769	.683	.627	.614	.714
1.50	1.016	1.039	.924	.811	.726	.673	.665	.782
2.00	1.016	1.066	1.070	.995	.930	.897	.924	1.139
2.50	1.016	1.066	1.149	1.140	1.112	1.111	1.188	1.521
3.00	1.016	1.066	1.167	1.247	1.271	1.315	1.452	1.922
3.50	1.016	1.066	1.167	1.317	1.405	1.505	1.714	2.338
4.00	1.016	1.066	1.167	1.349	1.516	1.681	1.971	2.765
4.50	1.016	1.066	1.167	1.352	1.602	1.842	2.223	3.201
5.00	1.016	1.066	1.167	1.352	1.663	1.987	2.468	3.644

Table 4. The values of F_k for the tank filled 95%

$k \backslash \theta(^{\circ})$	10.	20.	30.	40.	50.	60.	70.	80.
.10	.144	.074	.049	.035	.026	.019	.013	.008
.15	.207	.109	.072	.052	.039	.029	.021	.013
.20	.266	.142	.095	.069	.052	.039	.029	.020
.25	.321	.174	.117	.085	.065	.049	.038	.026
.30	.373	.205	.139	.102	.078	.060	.046	.036
.40	.469	.264	.181	.134	.103	.081	.064	.054
.50	.554	.320	.222	.166	.129	.102	.083	.074
.60	.631	.373	.262	.198	.155	.124	.102	.094
.70	.699	.423	.300	.229	.181	.146	.122	.115
.80	.759	.471	.337	.259	.206	.169	.143	.137
.90	.812	.516	.373	.289	.232	.191	.164	.160
1.00	.859	.559	.409	.318	.257	.214	.185	.184
1.10	.899	.600	.443	.347	.282	.236	.207	.208
1.20	.932	.639	.476	.375	.307	.259	.229	.234
1.30	.960	.676	.508	.403	.332	.282	.251	.260
1.40	.982	.711	.539	.431	.357	.305	.274	.286
1.50	.998	.744	.569	.458	.381	.328	.297	.314
2.00	1.016	.882	.707	.586	.501	.443	.416	.459
2.50	1.016	.979	.825	.704	.616	.559	.539	.615
3.00	1.016	1.039	.924	.811	.726	.673	.665	.782
3.50	1.016	1.065	1.006	.908	.831	.786	.794	.957
4.00	1.016	1.066	1.070	.995	.930	.897	.924	1.139
4.50	1.016	1.066	1.117	1.073	1.024	1.005	1.056	1.327
5.00	1.016	1.066	1.149	1.140	1.112	1.111	1.188	1.521

Table 5. The values of F_k for the tank filled 98%

$k \backslash \theta(^{\circ})$	10.	20.	30.	40.	50.	60.	70.	80.
.10	.061	.031	.020	.014	.010	.007	.005	.003
.15	.090	.046	.030	.021	.015	.011	.008	.005
.20	.117	.060	.039	.028	.021	.015	.011	.007
.25	.144	.074	.049	.035	.026	.019	.014	.010
.30	.170	.088	.058	.042	.031	.023	.017	.012
.40	.219	.116	.077	.055	.041	.031	.023	.017
.50	.266	.142	.095	.069	.052	.039	.029	.023
.60	.310	.168	.113	.082	.062	.047	.036	.029
.70	.353	.193	.130	.095	.072	.056	.043	.035
.80	.393	.217	.147	.108	.083	.064	.050	.042
.90	.432	.241	.164	.122	.093	.072	.057	.049
1.00	.469	.264	.181	.134	.103	.081	.064	.056
1.10	.504	.287	.198	.147	.114	.090	.072	.063
1.20	.538	.309	.214	.160	.124	.098	.079	.070
1.30	.570	.331	.230	.173	.135	.107	.087	.078
1.40	.601	.352	.246	.185	.145	.116	.095	.086
1.50	.631	.373	.262	.198	.155	.124	.102	.094
2.00	.759	.471	.337	.259	.206	.169	.143	.137
2.50	.859	.559	.409	.318	.257	.214	.185	.184
3.00	.932	.639	.476	.375	.307	.259	.229	.234
3.50	.982	.711	.539	.431	.357	.305	.274	.286
4.00	1.009	.775	.598	.484	.406	.351	.320	.342
4.50	1.016	.832	.655	.536	.454	.397	.368	.399
5.00	1.016	.882	.707	.586	.501	.443	.416	.459

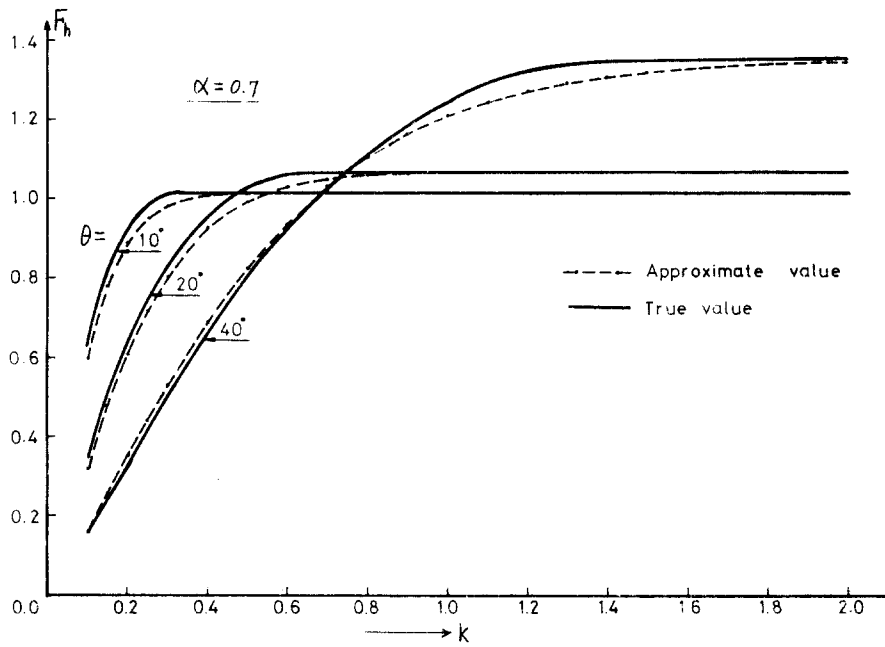


Fig. 4. Comparisons of the values F_h for the tank filled 70%

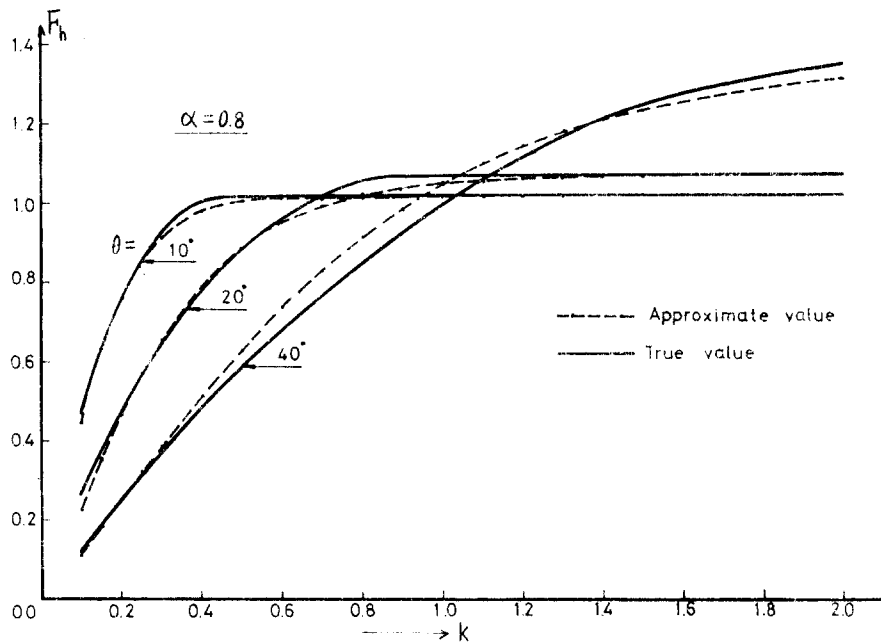


Fig. 5. Comparisons of the values F_h for the tank filled 80%

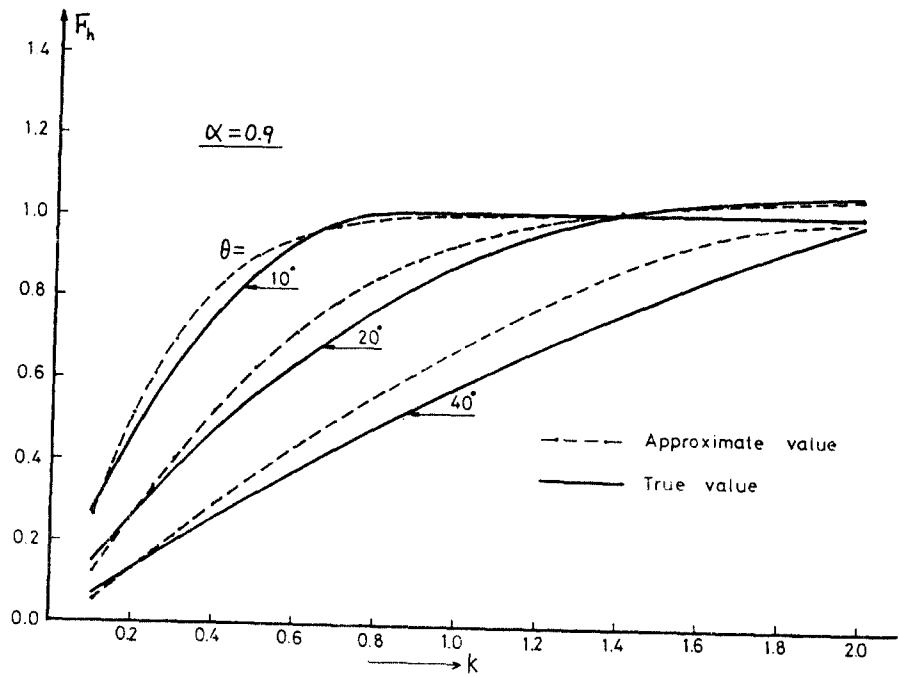


Fig. 6. Comparisons of the values F_h for the tank filled 90%

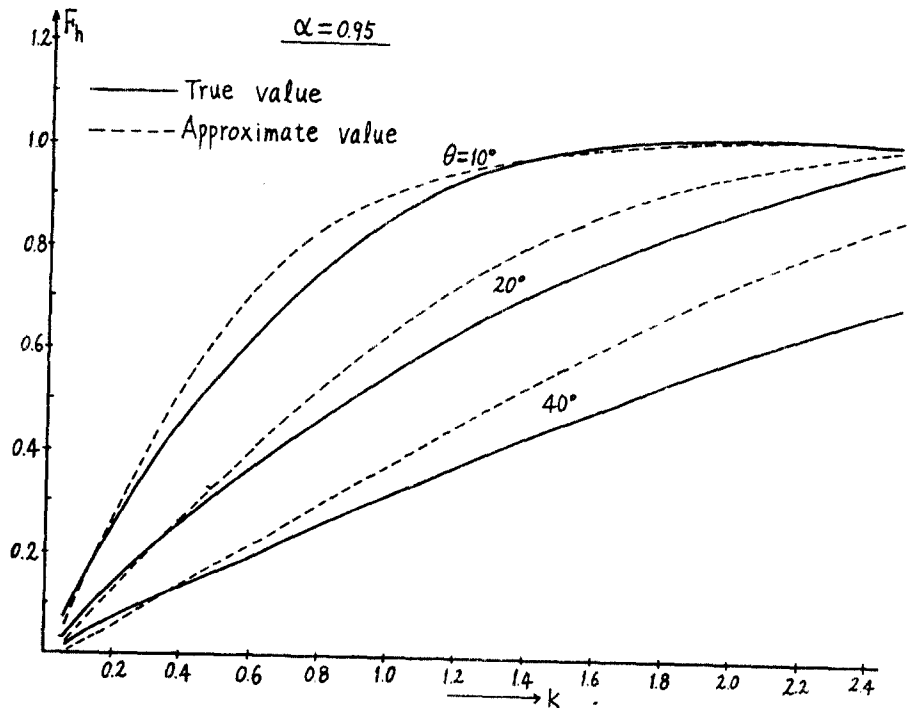


Fig. 7. Comparisons of the values F_h for the tank filled 95%

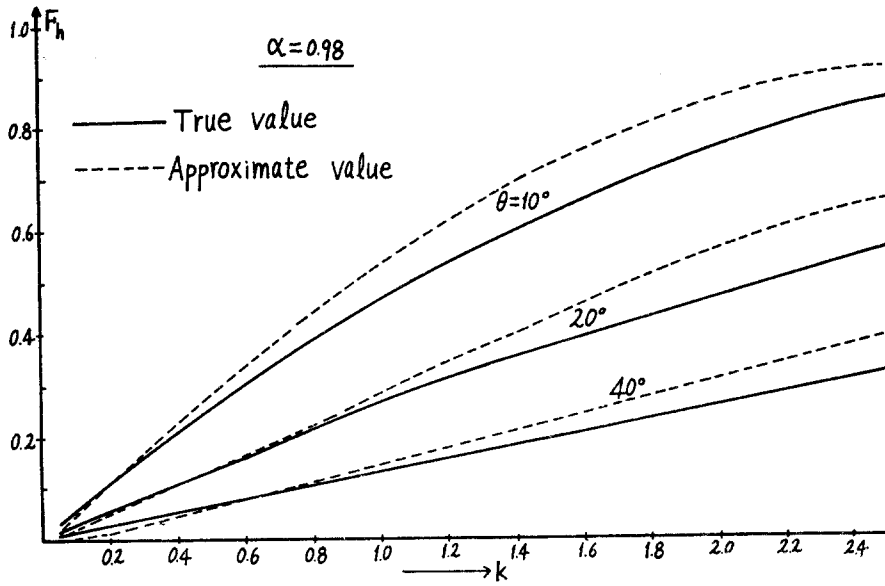


Fig. 8. Comparisons of the values F_h for the tank filled 98%

Fig. 9, 10, 11, 12, 13은 각각 70%, 80%, 90%, 95%, 98% 채워진 탱크에 대하여 가로 축을 배의 傾斜角度 θ 로 잡고 k 를 파라미터로 하여 F_h 의 값을 나타낸 것이다. 一般的으로 배의 傾斜角度가 커질수록 近似計算式의 誤差가 커짐을 볼 수가 있는데 이것 역시 近似値가 참값보다

크게 計算되므로 本 近似式에 의하여 배의 복원성을 評價하면 안전한 쪽이 될 것이고, 대체로 배의 傾斜角度가 45° 以內에서는 誤差가 그리 크지 않으므로 本 近似式은 實用的 價値가 있다고 생각된다.

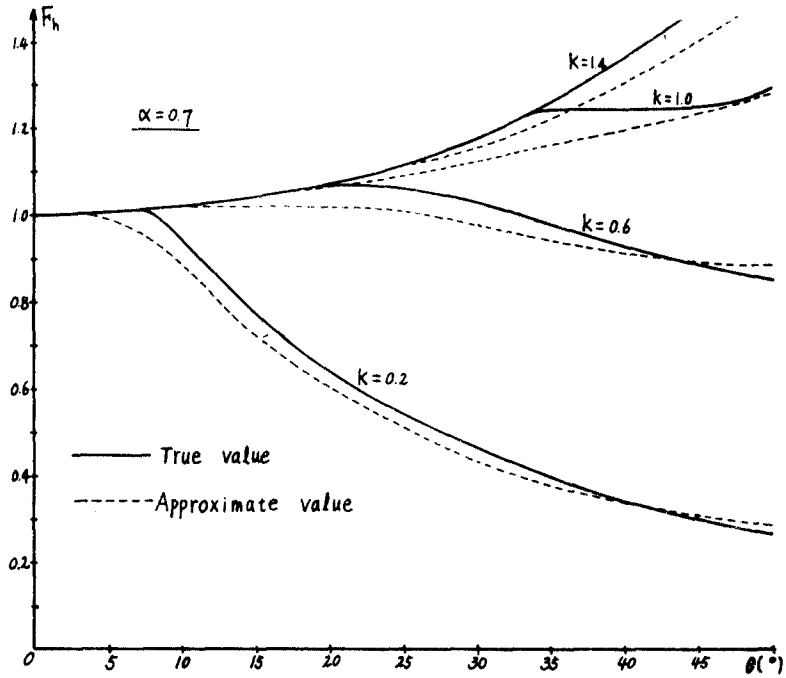


Fig. 9. Variation of the values F_h with respect to the inclined angle of ship for the tank filled 70%

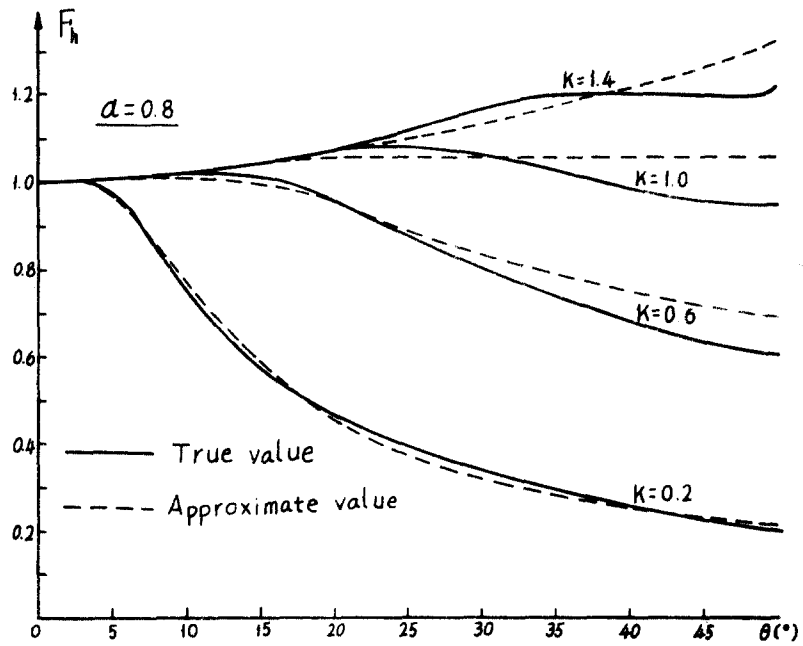


Fig. 10. Variation of the values F_h with respect to the inclined angle of ship for the tank filled 80%

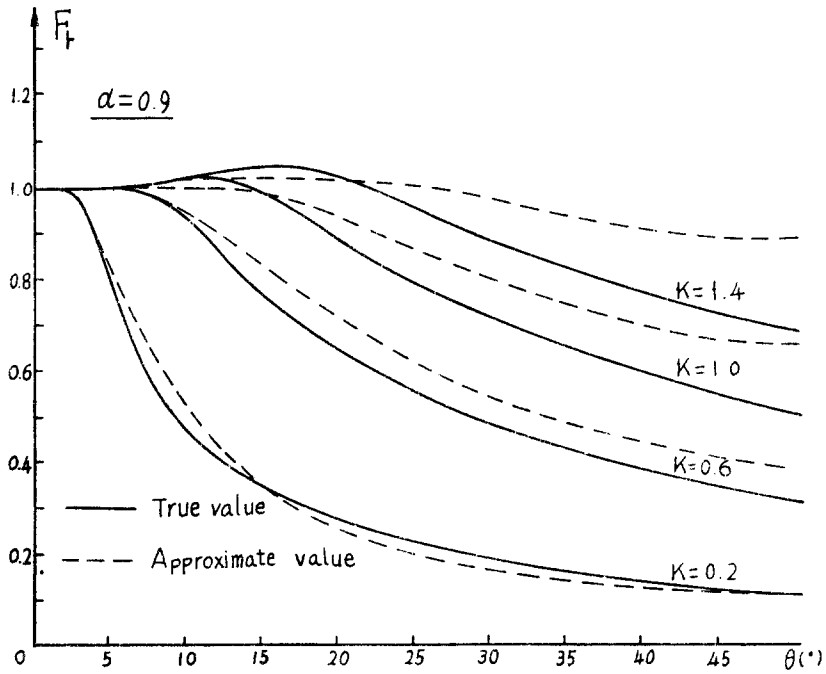


Fig. 11. Variation of the values F_t with respect to the inclined angle of ship for the tank filled 90%

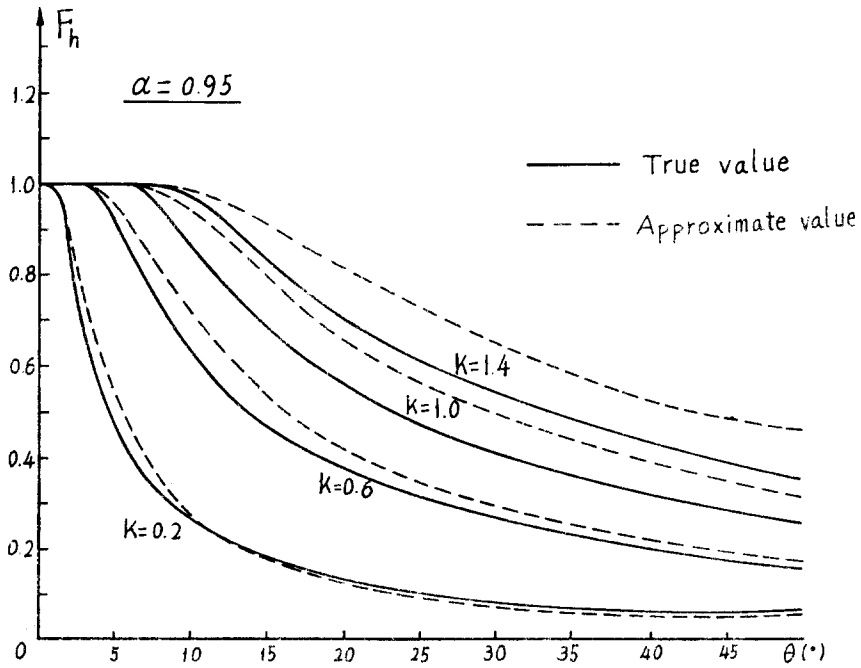


Fig. 12. Variation of the values F_h with respect to the inclined angle of ship for the tank filled 95%

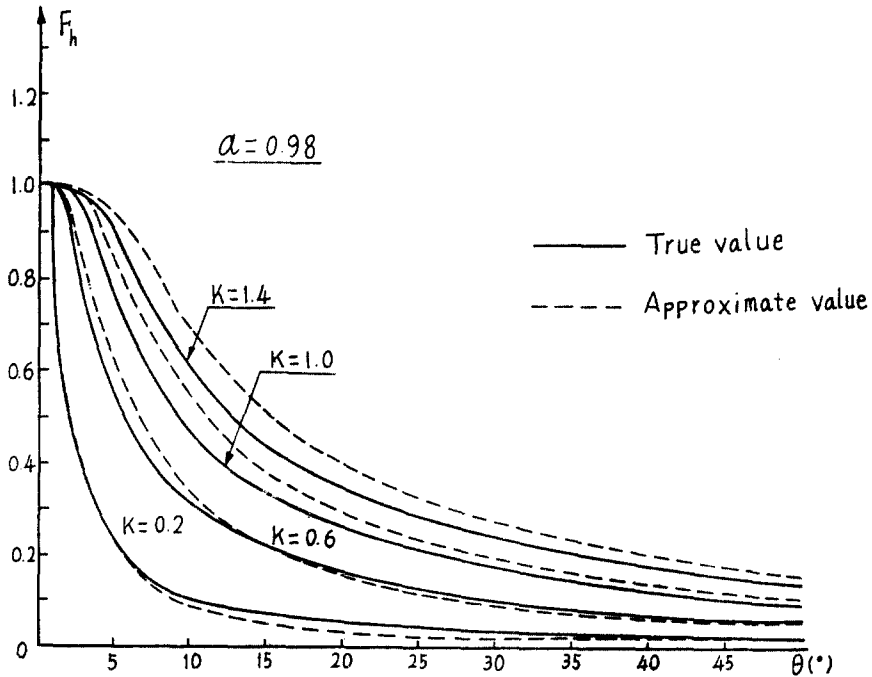


Fig. 13. Variation of the values F_h with respect to the inclined angle of ship for the tank filled 98%

5. 結 論

流動貨物を 실은 배가 傾斜하였을 때 液體重心의 移動狀況을 追跡하여 탱크 메타센터의 位置를 구하여 본 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 배가 傾斜하였을 때 탱크 天頂과 탱크 바닥이 自由表面에 接觸하지 않으면 탱크 메타센터의 높이 g_m 은 다음 式으로 計算된다.

$$g_m = \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \theta\right) \frac{i}{v}$$

- 2) 배가 傾斜하였을 때 탱크 天頂이나 탱크 바닥이 自由表面에 接觸하면 탱크 메타센터의 높이는 위 式으로 計算되는 값보다 작다.
- 3) 탱크 天頂이나 바닥이 自由表面에 닿든지 안닿든지 탱크 메타센터의 位置를 正確히 求할 수 있는 電算프로그램의 開發이 可能하다.

- 4) 탱크의 幅에 比하여 깊이가 깊은 탱크가 滿載되지 않은 狀態로 液體가 실려 있을 때는 탱크 메타센터의 높이가 보통 實務에서 計算하는 i/v 보다 커질 수가 있다.
- 5) 탱크 메타센터의 높이에 관한 近似式은 다음과 같고 배의 傾斜角度가 45° 以內에서는 實用上 信賴할만한 近似값을 준다.

$$g_m = \left(1 + \frac{1}{2} \tan^2 \theta\right)$$

$$\left[1 - \text{EXP}\left\{-12\left(\frac{\alpha(1-\alpha)k}{\tan \theta}\right)^{1.25}\right\}\right] \frac{i}{v}$$

- 6) 배의 傾斜角度가 45° 가 넘으면 본 近似式에 의한 탱크 메타센터의 높이는 실제보다 크게 計算되어 이를 기준으로 하여 배의 浮力성을 평가한다면 安全한 쪽이 되기는 하나 浮力성이 過소 평가된다.

本 研究에서 다루었던 탱크는 直六面體形의 탱크이었는데 如他の 形態를 가진 탱크에 관하여서도 추후 研究되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

1) Henry E. Rossel, Lawrence B. Chapman, "Principle of Naval Architecture", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1966.
 2) W. Muckle, "Naval Architecture for Marine Engineers", Butterworths, 1975.

3) 梁時權, 金頌甲, "船舶積貨", 韓國海洋大學海事圖書出版部, 1977.
 4) 森田知治, "船舶復原論", 海文堂, 昭和60年.
 5) 日本造船學會運動性能研究委員會, "船舶と海洋構造物の安全性と復原性", 日本造船學會, 昭和61年.
 6) 關西造船協會, "造船設計便覽", 海文堂, 昭和58年.

(부 록)

```

FUNCTION EFFRES(TH,AL,AK)
C
C THIS FUNCTION IS FOR CALCULATING THE FACTOR TO MULTIPLY TO THE
C INERTIA MOMENT OF FREE SURFACE TO GET EFFECTIVE FREE SURFACE.
C PARAMETER DISCRPTION;
C TH=INCLINED ANGLE OF SHIP IN RADIAN
C AL=RATIO OF FILLED VOLUME TO TANK CAPACITY (CURRENT VOLUME/TANK
C CAPACITY)
C AK=RATIO OF DEPTH TO WIDTH (DEPTH/WIDTH)
C
EFFRES=0.
IF(AL .LE. 0. .OR. AL .GE. 1.) GOTO 50
IF(AL .LT. 0.5) AL=1.-AL
IF(TH .LT. 0.) TH=-TH
IF(TH .GT. 1.5708 .OR. AK .LE. 0.) GOTO 50
PH1=ATAN(2.*(1.-AL)*AK)
PH2=ATAN(0.5*AK/(1.-AL))
TA=TAN(TH)
IF(TH .LE. PH1) GOTO 5
IF(TH .GT. PH2) GOTO 10
P1=SQRT(2.*AK*(1.-AL)/TA)
P2=2.*(1.-P1)*(P1*P1/3.-P1+1.)/(2.-P1)/(2.-P1)
P3=2.*AK*(1.-AL)*(1.-P1)/3./(2.-P1)/(2.-P1)
FH=(2.*P1+3.*P2)/TA+P1*(1.-0.5*P1)*TA+AK*(1.-AL)+3.*P3
EFFRES=AK*(1.-AL)*(2.-P1)*(2.-P1)*FH
GOTO 50
5 EFFRES=1.+0.5*TA*TA
GOTO 50
10 F=(2.*TA-AK/AL)/(2.*TA-AK)
P1=F*(6.*AL+AK*(1.-4.*AL)/TA)
P2=F*2.*(1.-AL)*AK
F=(2.*TA-AK/(1.-AL))/(2.*TA-AK)
P3=F*(6.*(1.-AL)+(4.*AL-3.)*AK/TA)
P4=F*2.*AL*AK
FH=8.*AK/TA/TA+(P1+P3)/TA+4.*AK+P2+P4
EFFRES=FH*AL*AK*(0.5*AK*(AL-1.)/TA+1.-AL)
50 RETURN
END
    
```