

淺水域에서의 船体沈下와 必要水深

孫 景 浩

On the Bow Sinkage and Necessary Depth of Sea in Shallow Waters

Son Kyoung-Ho

〈目 次〉	
1. 序 論	2.2 必要水深
2. 本 論	2.2.1 計算方法
2.1 船首沈下量	2.2.2 計算結果
2.1.1 Tuck의 理論式	3. 結 論
2.1.2 計算値 및 實驗値의 比較檢討	參考文獻

Abstract

Informations on ship's sinkage and necessary depth of sea are useful to mariners who navigate in shallow waters.

By using Tuck-Hooft formula, bow sinkages are calculated, and are compared with results of model tests. Furthermore, a method to calculate minimum depth of sea necessary for safe navigation is introduced.

Assumptions are made that sinkages are arisen along straight running courses in shallow waters of infinite width.

〈記號說明〉

- $D, W.$: Dead weight tonnage
 L : Length between perpendiculars
 B : Breadth of ship
 D : Depth of ship
 d : Draft
 γ : Volume of displacement
 H : Depth of sea

- V : Ship's speed
 g : Gravitational acceleration
 C_B : Block coefficient
 F_n : Froude's number(V/\sqrt{gL})
 F_{nh} : Froude's depth number(V/\sqrt{gH})

1. 序 論

最近 建造되는 Tanker는 점점 大型化되어 港內 및 海峽等의 水深은 吃水에 比較해서 相對的으로 낮아졌으며 淺水域에서의 航行 또는 船舶操縱이 制限을 받게 되었다.

淺水域에서의 船体沈下現象은 Bernoulli定理에 依해서 說明될 수 있으며 Squat現象은 Froude's No. 0.25程度의 高速에서 發生되므로 普通의 商船의 경우는 問題가 되지 않고 船首트림의 傾向이 있다.

淺水域에서 船舶이 旋回하는 경우는 船尾트림의 傾向이 있지만 旋回에 隨伴해서 減速되므로 問題가 되지 않는다.

따라서 普通의 商船의 경우, 淺水域에서의 船体沈下現象은 直進時의 船首沈下量이 問題가 된다.

淺水域의 船体沈下現象에 對해서 研究되기 시작한 것은 最近의 일이며 實船實驗에 依한 精密計測은 거의 不可能하고 模型實驗 및 理論的 計算에 依해서 研究된 바 있다.

制限水路에서의 船体沈下現象에 對해서 J. Kreitner는 Bernoulli定理를 利用하여 平均沈下量을 近似的으로 計算한 바 있으나 實用化되지 못했다. 또한 E. O. Tuck는 細長体理論을 써서 平均沈下量 및 트림變化量을 解析하였으며 J. P. Hoofit는 Tuck의 理論式으로부터 平均沈下量 및 트림變化量의 計算에 對한 略算式을 提案한 바 있다.

本論文은 上記 船体沈下現象에 對하여 最近 發表된 模型實驗에 依한 船首沈下量의 測定值를 Hoofit가 提案한 Tuck의 理論式에 依한 計算值와 比較하여 Tuck-Hoofit理論式의 妥當性을 檢討하였으며, 船舶의 크기에 따른 相異點을 調査하였다. 이로부터 100,000ton級 以上の 超大型 Tanker의 경우, Tuck-Hoofit 理論式의 修正을 提案하였으며 水路幅의 影響에 對해서도 言及하였고 淺水域에서의 航行 또는 船舶操縱의 參考資料로서의 最少 必要水深의 計算法을 論하였다.

2. 本 論

2.1 船首沈下量

2.1.1 Tuck의 理論式

E. O. Tuck는 細長体理論(Slender body theory)을 써서 無限히 넓은 淺水域에서의 船体沈下現象을 解析하였다. 무한히 넓은 淺水域에서 航走中인 船舶의 平均沈下量 Z 와 트림角變化 θ (radian)에 關해서 E. O. Tuck는 다음 式을 주고 있다.

$$Z = \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1-F_{nh}^2}} \cdot C_z \cdot \frac{V}{L^3} \dots\dots\dots(1)$$

$$\theta = \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1-F_{nh}^2}} \cdot C_\theta \cdot \frac{V}{L^3} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 C_z , C_θ 는 船体沈水部の 形狀에 依해서 決定되는 係數

한편 J. P. Hoofit는 式 (1), (2)에서의 C_z , C_θ 의 값으로 $C_z=1.46$, $C_\theta=1.0$ 을 取하면 良好한 近似

値가 計算될 수 있다고 提案했다.

따라서 略算式으로서 平均沈下量과 트림變化量を L 에 對한 %로 表示하면 다음 式과 같다.

$$Z(\%) = \frac{F^2_{nh}}{\sqrt{1-F^2_{nh}}} \cdot \frac{V}{(0.1L)^3} \times 0.146 \dots \dots \dots (3)$$

$$\tau(\%) = \frac{F^2_{nh}}{\sqrt{1-F^2_{nh}}} \cdot \frac{V}{(0.1L)^3} \times 0.1 \dots \dots \dots (4)$$

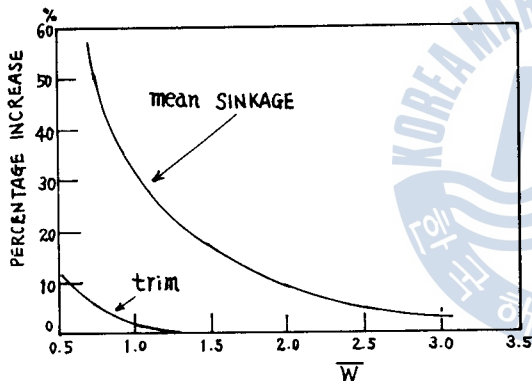
여기서 $Z(\%)$ 는 平均沈下量의 L 에 對한 比率, $\tau(\%)$ 는 트림變化量の L 에 對한 比率
 序論에서 言及한 바와 같이 淺水域에서 航走中인 普通의 商船은 船尾보다도 船首가 더 沈下하므로
 船首沈下量에 注目할 必要가 있다. 船首沈下量을 $S(\%)$ 라 하면 트림變化에 依해서 增加된船首
 吃水는 $\tau(\%)$ 의 $\frac{1}{2}$ 이라 볼 수 있으므로 式 (3), (4)로부터 다음 式을 誘導할 수 있다.

$$S(\%) = Z(\%) + \frac{1}{2}\tau(\%)$$

$$= \frac{F^2_{nh}}{\sqrt{1-F^2_{nh}}} \cdot \frac{V}{(0.1L)^3} \times 0.196 \dots \dots \dots (5)$$

여기서 $S(\%)$ 는 船首沈下量의 L 에 對한 比率

또한 E. O. Tuck는 水路의 幅의 影響에 關해서도 考察하여 5種의 船型에 對해서 解析한 結果, Fig.1과 같은 Graph를 提案했다. Fig.1은 \bar{W} 를 橫座標로 하여 無限幅淺水域에 對한 增分을 Plot한 것으로서 船型에 關係없이 利用할 수 있는 Graph이다. W 는 船舶의 길이에 對한 水路의 有效幅을 나타내는 水路有效幅長比(Effective width ship length ratio)로서 다음式으로 表示된다.



$$\bar{W} = \frac{W}{L} \sqrt{1-F^2_{nh}} \dots \dots \dots (6)$$

여기서 W 는 水路의 幅

Fig. 1. The Effect of Width of Canal (by Tuck's Analysis)

2.1.2 計算值 및 實驗值의 比較檢討

Table 1. Dimensions of Ships Calculated and Tested

	Ship "A"	Ship "B"	Ship "C"	Ship "D"
Kind of Ship	Tanker	Tanker	Tanker	Tanker
$D.W.$	10,000t	120,000t	100,000t	150,000t
L	155.5m	261m	246m	290m
B	20.7m	43.5m	40.2m	47.5m
D			21.8m	24.0m
d	9.21m	15.35m	15.0m	16.0m
C_B	0.8	0.8	0.8	0.8

淺水域에서 航走中인 船舶의 船首沈下量에 對한 Tuck-Hooft 理論式의 妥當性을 檢討하기 爲해 서 最近 發表된 模型實驗結果로부터 提案된 實驗値와 理論式에 依한 計算値를 比較해 본다. Table 1에 明示한 4種의 船型에 對해서 計算値와 實驗値를 圖示하면 Fig.2~Fig.5와 같다. Fig.2는 美國 Taylor試驗水槽(David Taylor Model Basin: D. T. M. B)에서 行한 模型實驗結果와 式(5)의 Tuck-Hooft理論式에 依한 計算値를 Plot한 것이고 Fig.3~Fig.5은 日本 神戶商船大學에서 行한 模型實驗結果와 Tuck-Hooft 理論式에 依한 計算値를 Plot한 것이다.

D. W. 10,000ton級인 船舶 "A"의 경우(Fig.2) Tuck-Hooft 理論式은 實驗値와 잘 맞고 있지만, D. W. 100,000ton級 또는 그 以上인 船舶 "B", "C" 및 "D"의 超大型 Tanker의 경우(Fig.3 ~Fig.5) Tuck-Hooft 理論式은 實驗値보다 작은 값으로 나타나며 超大型船舶이 續出하고 있는 現趨勢로 볼때 相當한 危險을 內包하고 있다고 看做된다.

따라서 操船者의 立場이라는 船舶의 安全 Side의 側面에서 볼 때 Tuck-Hooft 理論式은 最少 限 25%를 더 追加하지 않으면 안된다고 主張한다.

Tuck-Hooft理論式의 25%를 더 追加한 값(Tuck-Hooft理論値 \times 1.25)을 Plot하여 實驗値와 比較해 보면 Froude's No. 0.07~0.10程度의 速力에서는 實驗値와 잘 맞고 있으며 安全 Side의 값이라고 할 수 있을 것이다. 그러나 超大型 Tanker가 Froude's No. 0.11을 넘는 速力으로 淺水域을 航走하면 筆者가 提案한 값일지라도 適切한 情報를 提供하지 못함을 알 수 있다.

한편 幅이 制限된 水路의 경우, Tuck의 解析에 依한 水路幅의 影響을 考慮하여(Fig.1의 資料에 依해서) 船首沈下量을 計算한 結果를 圖示하면 Fig.6과 같다. Fig.6은 D. W. 120,000ton의 Tanker (船舶 "B")에 對해서 筆者가 提案한 無限히 넓은 淺水域에서의 船首沈下量과 幅이 L인 制限水路에서의 船首沈下量을 Plot한 것이다. 幅이 制限된 水路의 경우는 淺水의 影響과 함께 水路幅의 影響을 相當히 받기때문에 이를 無視할 수 없으며 操船者는 더욱 注意해야 한다는 것을 示唆하고 있다.

2.2 必要水深

2.2.1 計算方法

淺水域에서 船舶이 航走할 때는 淺水影響에 依한 船體沈下現象뿐만 아니라 船體運動에 依한 上下 動 및 橫搖現象, 海圖의 水深精度, 海象·氣象等의 環境條件, 海底의 障礙物, 投下 Anchor에 對한 餘裕, 主機冷却水流入을 爲한 餘裕 및 航路의 交通量等을 堪案하여 航海 및 船舶操縱에 最適한 必要水深(Necessary depth of sea)을 決定해야 한다.

淺水影響에 依한 船體沈下量은 定量的으로 計算이 可能하지만 其他의 現象 및 條件에 對해서는 豫測 또는 推定에 依해서 값을 決定할 수밖에 없다.

따라서 淺水影響에 依한 船體沈下現象을 除外한 上記 여러가지 現象 및 條件을 堪案하여 淺水域에서 航走中인 船舶의 餘裕水深(Under-keel clearance 또는 Bow clearance)을 考慮해야 한다.

本論文에서는 유럽導船士協會(Europe Marine Pilot Association: E. M. P. A)가 提案한 값을 利用하여 淺水域의 航行에 있어서 最少限의 必要水深을 計算한다. 유럽導船士協會가 提案한 餘裕水深은 外海淺水域에서는 吃水의 15%, 港外淺水域에서는 吃水의 10%, 港內淺水域에서는 吃水의 5%를 추천하고 있다.

Fig. 7은 淺水域을 航走中인 船舶 "B"(D. W. 120,000ton Tanker)의 여러 速力에 對한 船首沈下量과 水深과의 關係Graph로서 筆者가 提案한 Tuck의 理論式에 依해서 計算한 結果를 Plot한 것이다.

Bow Clearance를 吃水의 10%로 取할 때(港外淺水域인 경우)의 必要水深을 求해 보면(Fig.7 參照) 우선 補助線으로서 0點으로부터 45°의 傾斜를 갖는 直線을 긋고 縱軸의 1.1點에서 補助線에 平

行線을 그어 速力曲線과 만나는 點에 對한 縱軸의 값을 읽으면 各各의 速力에 對한 必要水深을 얻을 수가 있다.

2.2.2 計算結果

上述한 計算方法에 依해서 船舶 "B"(D.W. 120,000ton Tanker)에 對한 必要水深을 求한 結果를 圖示하면 Fig.8과 같다.

이런 特定한 船型에 對해서 Fig.8과 같은 Graph를 그려 놓으면 淺水域을 航行中일 때 船舶操縱의 參考資料로서 利用度가 높을 것이다.

3. 結 論

以上の 考察로부터 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

- ① D.W. 10,000톤級의 船舶에 對해서 Tuck-Hooft의 理論式은 實驗値와 잘 맞는다.
- ② D.W. 100,000톤級 또는 그以上の 超大型 Tanker에 對해서 Tuck-Hooft의 理論式은 修正補完을 要하며 最少限 25%의 Margin을 考慮해야 하고 Froude's No. 0.11 以上の 速力에서는 正確한 情報를 提供하지 못한다.
- ③ 幅이 制限된 水路에서의 船体沈下 現象은 淺水影響뿐만 아니라 水路幅의 影響을 考慮해야 하며 이에 對해서는 今後 더욱 研究가 要望된다.
- ④ 淺水域의 最少必要水深은 本稿에서 提案한 計算法에 依해서 쉽게 求할 수 있으며, 이런 特定한 船型에 對해서 造船所側 또는 航海士가 미리 必要水深을 計算해 놓으면 淺水域의 航海 또는 船舶操縱에 參考資料가 될 것이다.

參 考 文 獻

- 1) 井上正祐, 藤野正隆, "制限水路の操縦性", 第2回操縦性シンポジウム, 日本造船學會, 1970, p.61~84.
- 2) 尹点東, "巨大型船의 操船理論과 實務", 重成出版社, 1976, p.37~54.
- 3) 谷初藏, "VLCC에 關する十章", 日本海難防止協會, 1975, p.87~107.
- 4) F. H. Todd, "Principles of Naval Architecture", SNAME, 1967, p.320~329.

行線을 그어 速力曲線과 만나는 點에 對한 縱軸의 값을 읽으면 各各의 速力에 對한 必要水深을 얻을 수가 있다.

2.2.2 計算結果

上述한 計算方法에 依해서 船舶 "B"(D.W. 120,000ton Tanker)에 對한 必要水深을 求한 結果를 圖示하면 Fig.8과 같다.

이런 特定한 船型에 對해서 Fig.8과 같은 Graph를 그려 놓으면 淺水域을 航行中일 때 船舶操縱의 參考資料로서 利用度가 높을 것이다.

3. 結 論

以上의 考察로부터 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

- ① D.W. 10,000톤級의 船舶에 對해서 Tuck-Hooft의 理論式은 實驗値와 잘 맞는다.
- ② D.W. 100,000톤級 또는 그以上の 超大型 Tanker에 對해서 Tuck-Hooft의 理論式은 修正補完을 要하며 最少限 25%의 Margin을 考慮해야 하고 Froude's No. 0.11 以上の 速力에서는 正確한 情報를 提供하지 못한다.
- ③ 幅이 制限된 水路에서의 船体沈下 現象은 淺水影響뿐만 아니라 水路幅의 影響을 考慮해야 하며 이에 對해서는 今後 더욱 研究가 要望된다.
- ④ 淺水域의 最少必要水深은 本稿에서 提案한 計算法에 依해서 쉽게 求할 수 있으며, 이런 特定한 船型에 對해서 造船所側 또는 航海士가 미리 必要水深을 計算해 놓으면 淺水域의 航海 또는 船舶操縱에 參考資料가 될 것이다.

參 考 文 獻

- 1) 井上正祐, 藤野正隆, "制限水路の操縱性", 第2回操縱性シンポジウム, 日本造船學會, 1970, p. 61~84.
- 2) 尹点東, "巨大型船의 操縱理論과 實務", 亞成出版社, 1976, p. 37~54.
- 3) 谷初藏, "VLCC에 關する十章", 日本海難防止協會, 1975, p. 87~107.
- 4) F. H. Todd, "Principles of Naval Architecture", SNAME, 1967, p. 320~329.

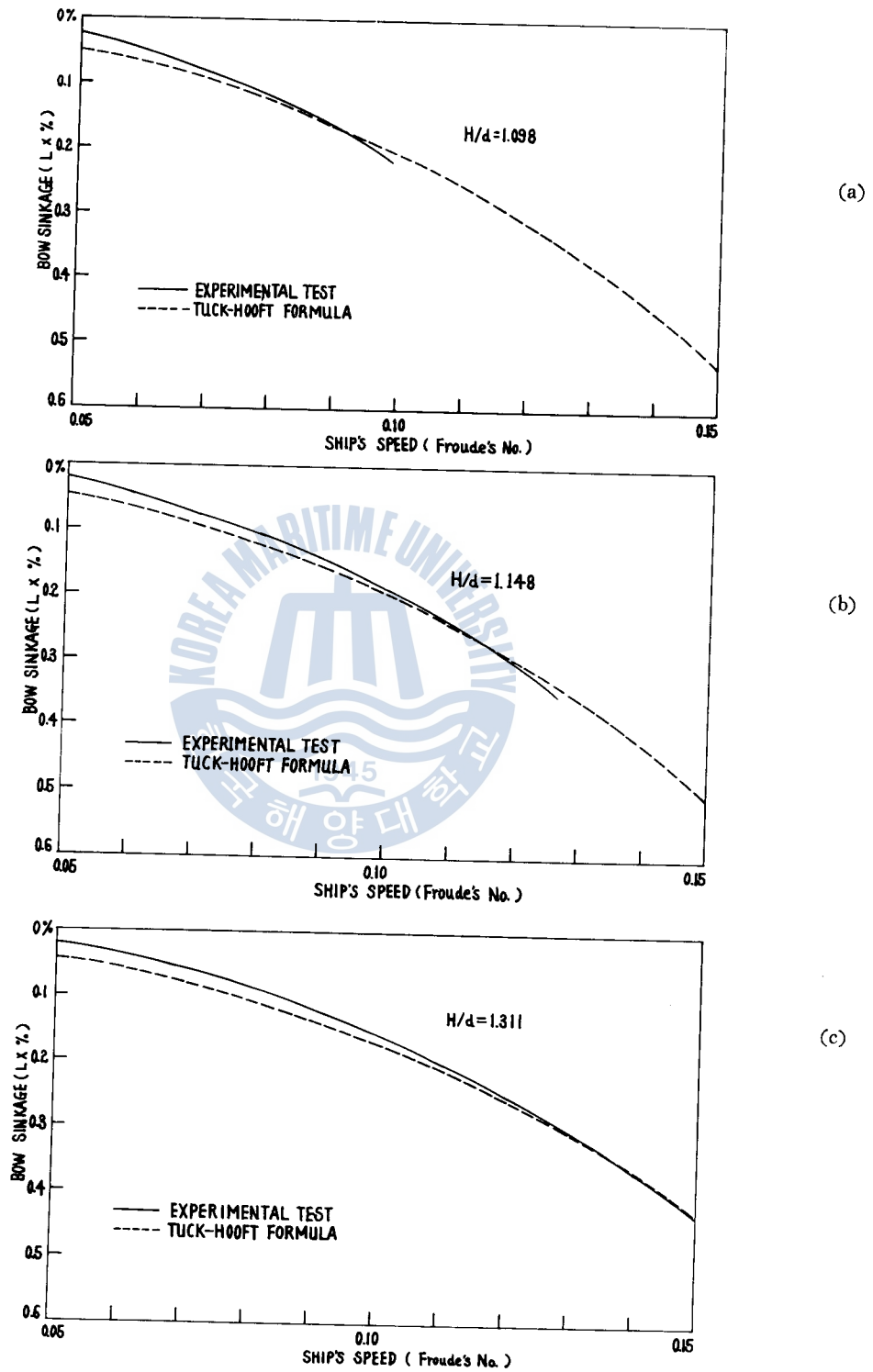
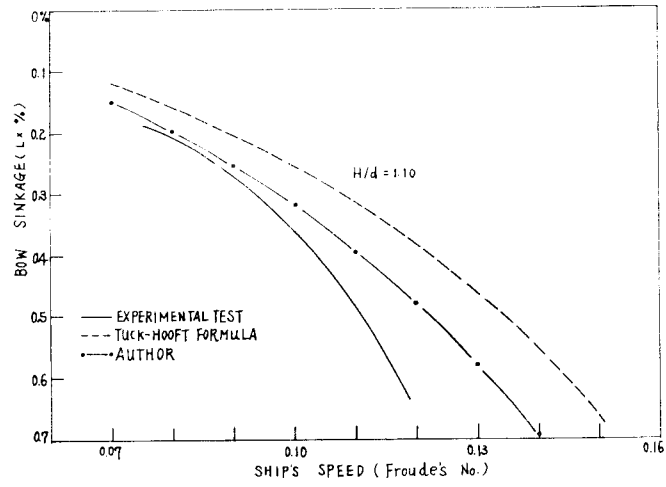
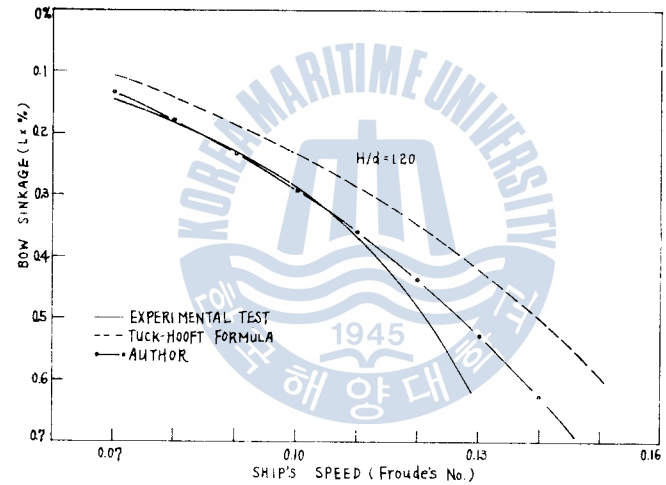


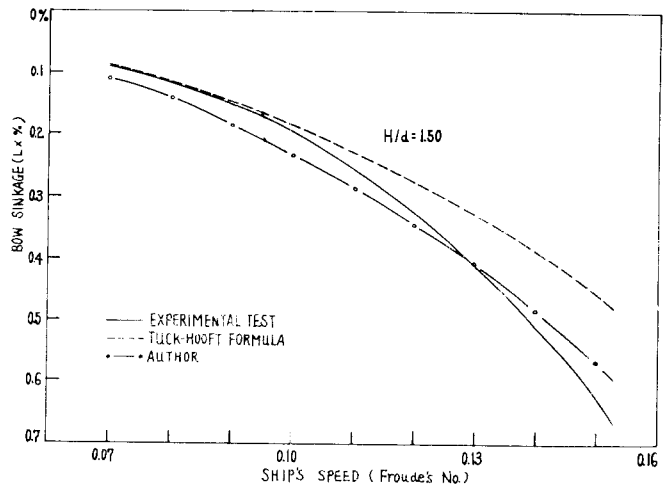
Fig. 2. Bow Sinkage of D.W. 1,000ton Tanker(Ship "A")



(a)

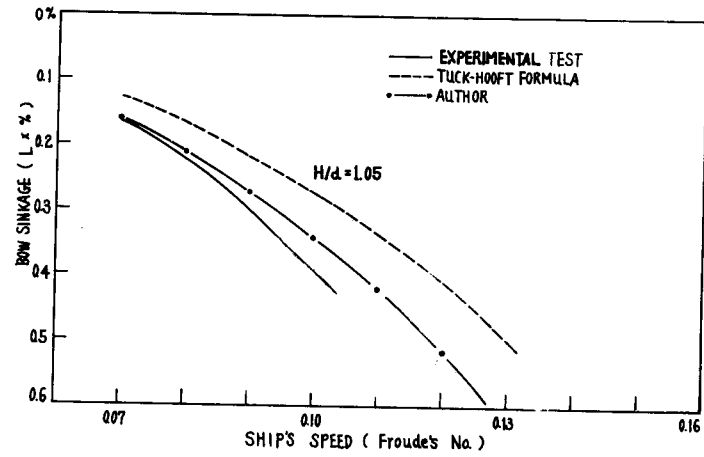


(b)

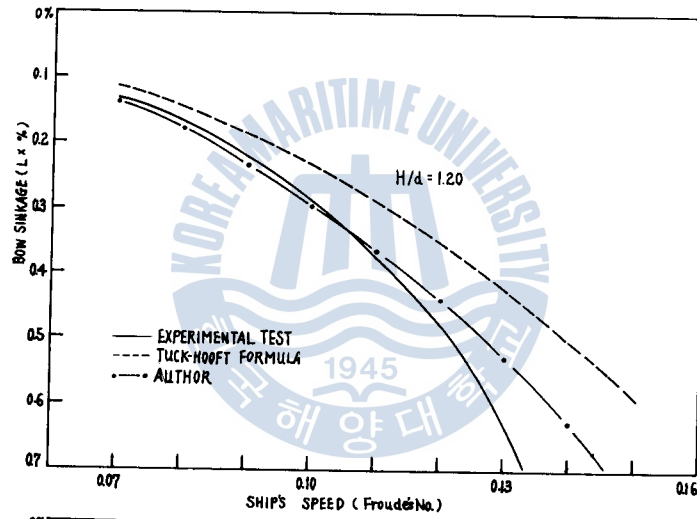


(c)

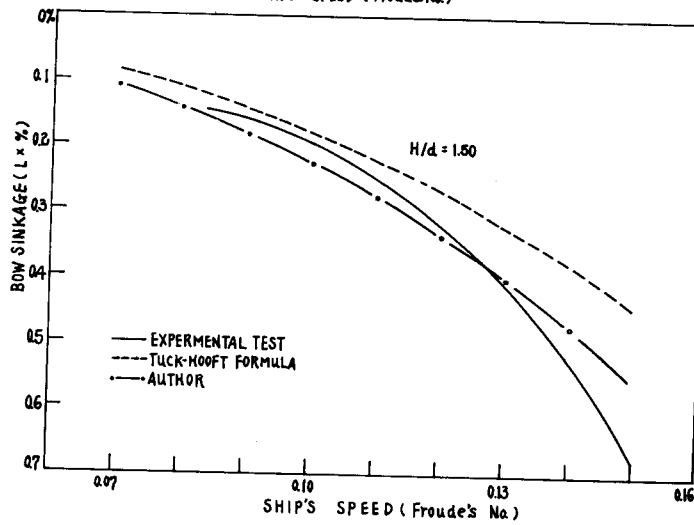
Fig. 3. Bow Sinkage of D. W. 120,000ton Tanker(Ship "B").



(a)

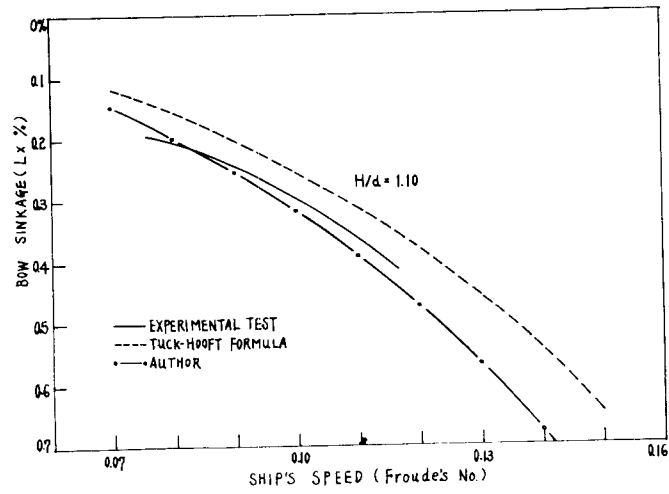


(b)

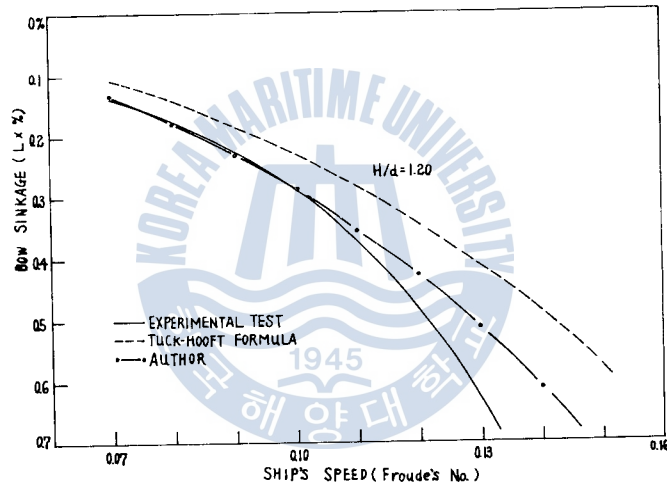


(c)

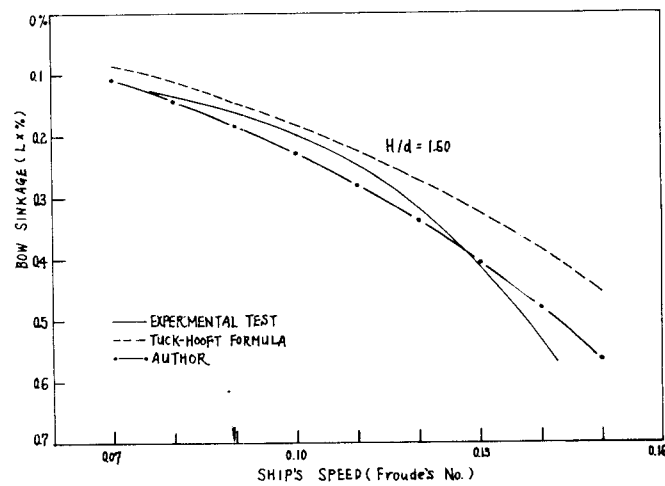
Fig. 4. Bow Sinkage of D. W. 100,000ton Tanker(Ship "C")



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Bow Sinkage of D. W. 150,000ton Tanker(Ship "D")

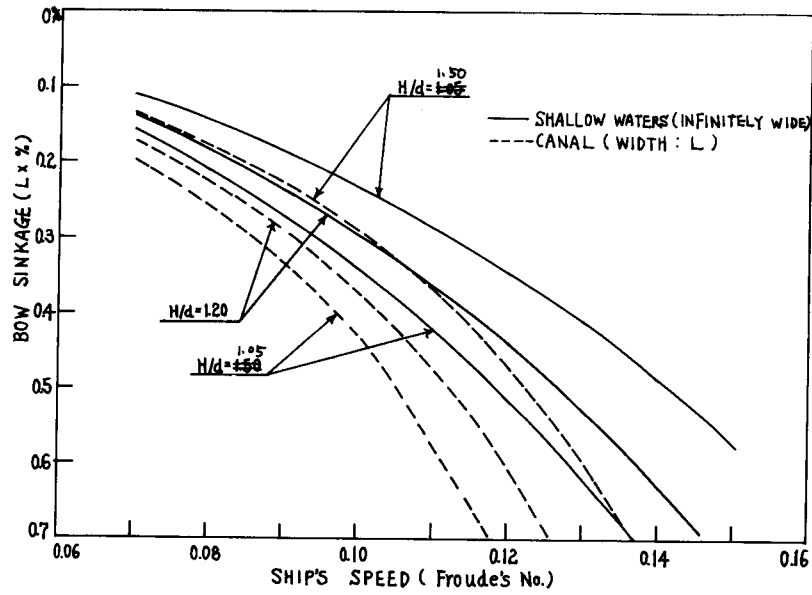


Fig. 6. The Effect of Width of Canal on Bow Sinkage(for Ship "B")

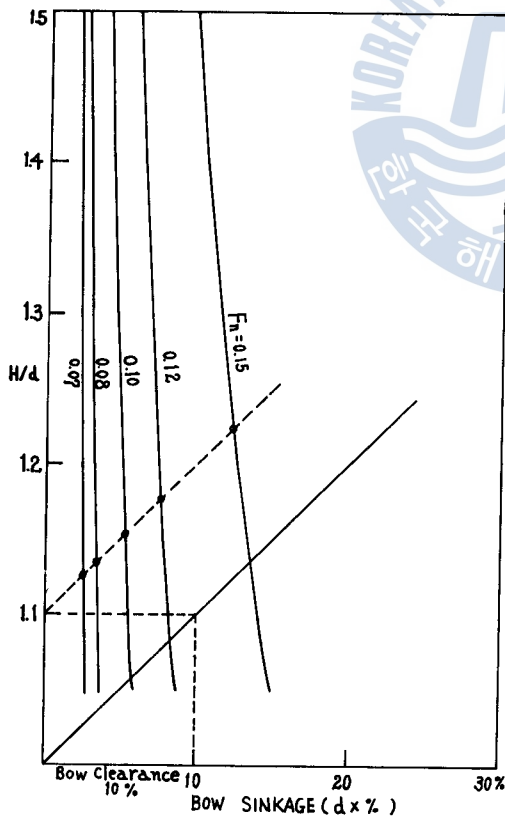


Fig. 7. Calculation Method of Necessary Depth of Sea(for Ship "B")

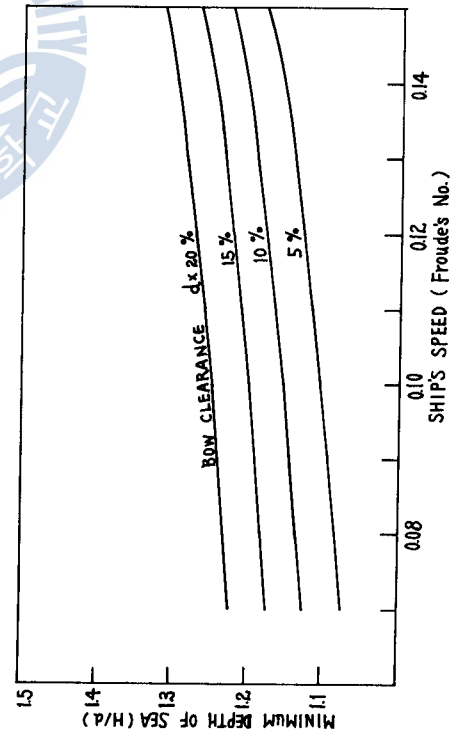


Fig. 8. Necessary Depth of Sea(for Ship "B")