

規則波中에서의 船體의 抵抗

黃 宗 屹*

1. 序 言

船舶이 平水中을 航行할 때에 比해서 波浪中을 航行할 때에 더 큰 抵抗을 받는다는 것은 일찍부터 알려진 經驗인 事實이나 우리들은 아직껏 波浪中을 航行할 때의 抵抗增加를 正確하게 推定할 수 있는 決定的인 資料를 가지고 있지 않다. 이번 機會에 이 問題解決에 관한 史的인 考察과 아울러 最近에 얻어진 結果를 簡單히 紹介하고자 한다.

2. 波浪에 基因한 增加抵抗에 관한 初期理論(船體動搖를 無視할 때)

波浪中을 航行할 때 배가 받는 抵抗의 增加를 造波抵抗理論의 見地에서 徹頭에 究明할 것을 試圖한 사람은 Havelock 이다(1937). 그는 처음에 不幸히도 普通의 線型理論에 依存한다면 海洋波의 影響에 의해서 배의 造波抵抗의 平均値가 增加하지 않는다는 結論에 到達되어 失敗에 돌아갔었다 [1].

다음에 Kreitner 는 抵抗의 增加는 完全히 船體 表面에 있어서의 海洋波의 反射에 基因하는 것이라는 見地에서 다음과 같은 半實驗式을 提案하였다.

배의 動搖를 無視한 Kreitner 의 波浪에 依한 抵抗增加 ΔR 은

$$\Delta R = g\rho B \zeta_a^2 \sin \alpha. \tag{1}$$

여기서 α 는 水線과 中心線面사이의 entrance angle 이며, B 는 배의 幅, ζ_a 는 波濤의 振幅(波高 $h=2\zeta_a$) 이다 α 를 L/B 의 項으로 表示하고 $\Delta R/A$ 의 概念을 導入하여 Kreitner 는

$$\Delta R/A = \frac{B}{H} \left[0.8 \frac{h}{L} \right]^2 \tag{2}$$

와 같은 結果에 到達했었다 [2].

그러나 Havelock 이 같은 條件下에서 嚴密한 計算을 한 結果 反射에 의해서 發生하는 抵抗增加는 實測値보다 훨씬 작은 量이라는 結論을 냈으므로 [3]. Kreitner 의 理論은 一旦 否定되고 말았다. Havelock 이 준 式은

$$\Delta R = \frac{1}{2} g\rho \zeta_a^2 B \overline{\sin^2 \alpha} \tag{3}$$

와 같다. 여기서 $\overline{\sin^2 \alpha}$ 는 $\sin^2 \alpha$ 의 平均値를 表示한다.

그後 1953年 Jacobs 와 Lewis [4]는 Kreitner 의 式(1)를 몇개의 模型試驗에 適用하였으며 (1)을 다음과 같이 修正하였다.

$$\Delta R = 0.174 g\rho \zeta_a^5 (\overline{\sin \alpha})^{1/3} \tag{4}$$

3. 波浪에 基因한 增加抵抗에 관한 最近理論(船體動搖를 考慮할 때)

* 正會員, 서울大學校 工科大學

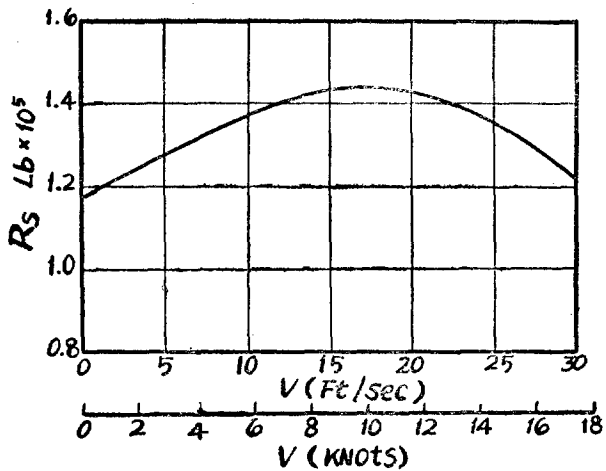


Fig. 1 Additional Resistance in the seaway $L_w/L=1.25$, $\zeta_0=10 \text{ Ft}$.

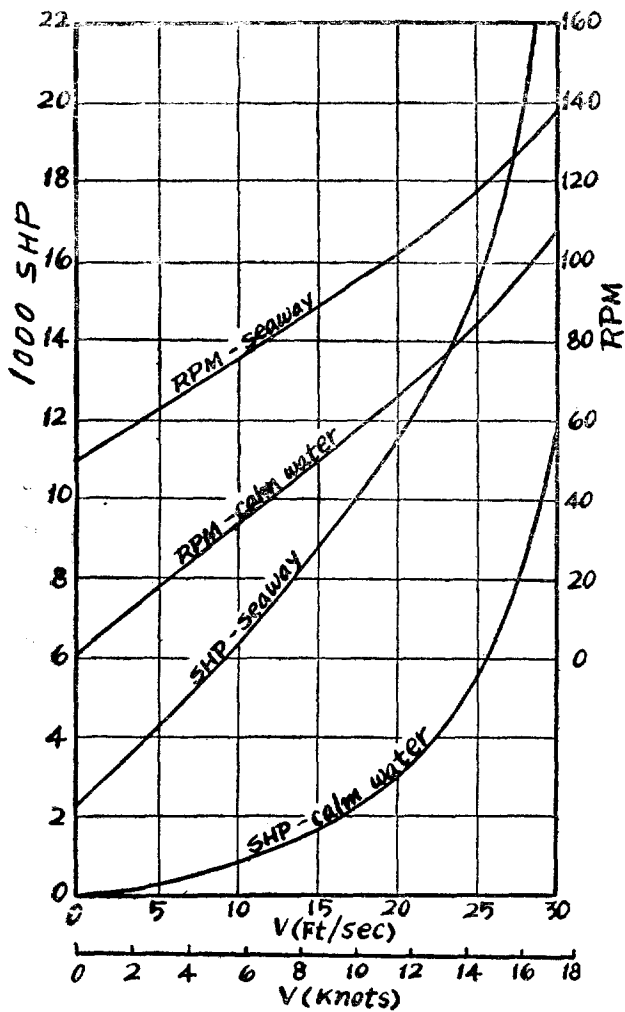


Fig. 2 Powering in Seaway, $L_w=600 \text{ Ft}$, $\zeta_0=10 \text{ Ft}$.

1942 年에 Havelock 는 波濤의 強制力과 船體動搖의 位相差로부터 抵抗增加를 導出하는 理論을 確立하였으
 며[5], St. Denis 가 數值計算을 遂行하여 波浪中에 있어서 船의 軸馬力이 相當히 增加된다는 것을 表示하였
 다[6]. (Fig. 1, Fig. 2) St. Denis 의 計算에 使用된 船의 要目은 다음과 같다

$$L = 600 \text{ ft.} \quad B = 81.40 \text{ ft.}$$

$$H = 31.60 \text{ ft.} \quad A = 32,800 \text{ tons}$$

$$\frac{1}{2} \alpha E = 15 \text{ deg.}$$

計算은 $L_w=750 \text{ ft.}$, $h=2\zeta_a=20 \text{ ft.}$ 의 規則波를 正面으로 船가 0 에서 30 ft/sec(17.75 Knots)로 航行할 때에 대
 하여 遂行되었다.

이와같은 方法만으로는 問題가 解決되었다고 볼 수 없다. 最近에 이르러서 Hanaoka(花岡)는 平水中을 強制
 的으로 微小調和振動을 하면서 一定한 速度로 進行하는 船體에 對해서 Michell 의 理論[7]과 同等한 假定에 依
 해서 線型理論을 適用하고 船가 받는 抵抗의 時間的 平均値를 주는 式을 세우는데 成功했다[8]. 그 結果에 依
 하던 船體가 強制縱搖를 함으로서 그 造波抵抗이 定常運動에 있어서의 값보다도 相當히 增加할 수 있다는 것이
 밝혀졌다. Hanaoka 는 더욱 海洋波의 作用이 平水中에서 船體가 波型으로 變形運動하는 影響과 同等하다고 보
 고 前記의 理論을 波浪中을 航行하는 船體에 까지 擴張하였다[9]. Hanaoka 에 依한 이 抵抗增加는 分明히
 Havelock 이 指道한 것과는 別個의 것이다. 그러므로 波浪中에 있어서의 抵抗增加는 적어도 서로 다른 2種類의
 成分을 가진다는 것이 判明되었다.

Hanaoka 는 以上の 2 個의 成分의 和가 波浪中에서의 模型船抵抗의 實測値에 極히 가까운 값을 갖는다고 主
 張하고 있다[10]. 그러나 Hanaoka 의 理論에서는 波濤에 依한 抵抗增加가 船體의 假想的變形으로부터 導出된 다
 고 하는 點에서 多少 理論上 無理가 있는 것 같이 보인다.

波浪中에 있어서의 船體의 抵抗을 造波抵抗理論에 依해서 解析하는데 있어서 直面하는 最大의 難關은, 抵抗
 의 增加가 海洋波의 波高의 2 乘으로 나타난다는 點에 있다. 普通의 線型理論에 있어서의 波高의 2 乘은 高次의
 微小量으로서 省略되기 때문에 Havelock 의 研究에서도 볼 수 있는 것과 같이 이것을 省略했기 때문에 抵抗增
 加가 나타나지 않는 것이다. 그러나 그렇다고해서 線型理論이 無價値하다고 斷定해서는 안된다. 元來 水面波의
 線型理論에서는 自由表面의 條件이 水面의 傾斜가 微小하다고 하는 假定下에서 線型化되어 있는 것이며 物體表
 面에 있어서의 現象이 線型化되어 있는 것을 뜻하는 것은 아니다.

Maruo(丸尾)는 이와같은 見地에서 壓力方程式中の 速度의 2 乘의 項을 物體表面上에 남겨서 생각하였다. 事
 實에 있어서 波濤에 의한 抵抗增加는 이 項에 의해서 나타난다. Maruo 는 船體動搖가 海洋波의 強制力에 依해
 서 일으켜진다는 것을 考慮하고 船體의 運動方程式을 利用함으로써 船體에 作用하는 水平力의 時間的 平均値가
 極히 簡潔한 表示式을 가지는 것을 發見하였다[11]. 그러나 이式을 使用하여서 船體가 받는 抵抗을 實際로 計
 算하는데 있어서의 船體의 運動을 미리 求解를 必要가 있는데 이 計算은 抵抗의 計算에 比해서 더욱 큰 困難
 이 同伴된다. 그러한 理由로 Maruo 는 1957 年에 極히 近似的이며 實用的 計算法을 考案하여 그것에 따라서 計
 算한 船體運動을 使用하여 向波에 있어서 船體가 받는 抵抗增加를 計算했다[12].

Vossers 와 Stam 은 上記한 여러사람들의 研究結果를 綜合하였으며, 向波에 있어서의 抵抗增加는 다음과 같은
 3 個의 成分으로 構成된다고 說明하고 있다[13].

- (1) 平水中에서 強制動搖를 받는 船體에 依해서 經驗되는 것.

- (2) 波濤의 強制力과 船體의 運動사이의 位相의 差異에 起因하는 것.
- (3) 쳐오는 波濤의 船體에서의 反射로부터 結果되는 것.

Maruo에 依하면 波長 L_w , 波高 $h(= 2\zeta_a)$ 인 波를 向해서 動搖하면서 一定한 平均速度 U 로 前進할 때 船體가 받는(上記 3成分을 包含한) 抵抗增加量 ΔR 은

$$\Delta R = K_w \rho g \zeta_a^2 \frac{B^3}{L} \tag{5}$$

과 같다[12]. 여기서 K_w 는 增加抵抗係數이며

$$\begin{aligned} K_w &= \frac{\Delta R}{\rho g \zeta_a^2 \frac{B^3}{L}} \\ &= D_{11} \left(\frac{Z_a}{\zeta_a} \right)^2 + D_{22} \left(\frac{\theta_a}{2\pi} \frac{L_w}{\zeta_a} \right)^2 + D_{12} \left(\frac{Z_a}{\zeta_a} \right) \left(\frac{\theta_a}{2\pi} \frac{L_w}{\zeta_a} \right) \cos(\epsilon_{\zeta z} - \epsilon_{\zeta \theta}) \\ &\quad + D_{13} \frac{Z_a}{\zeta_a} \cos \epsilon_{\zeta z} + D_{23} \left(\frac{\theta_a}{2\pi} \frac{L_w}{\zeta_a} \right) \cos \epsilon_{\zeta \theta} + D_{33} \end{aligned} \tag{6}$$

Z_a 는 上下動의 振幅, θ_a 는 縱搖振幅, $\epsilon_{\zeta z}$ 는 波濤와 上下動사이의 位相差, $\epsilon_{\zeta \theta}$ 는 波濤와 縱搖사이의 位相差이며 D_{ij} 는 係數이다.

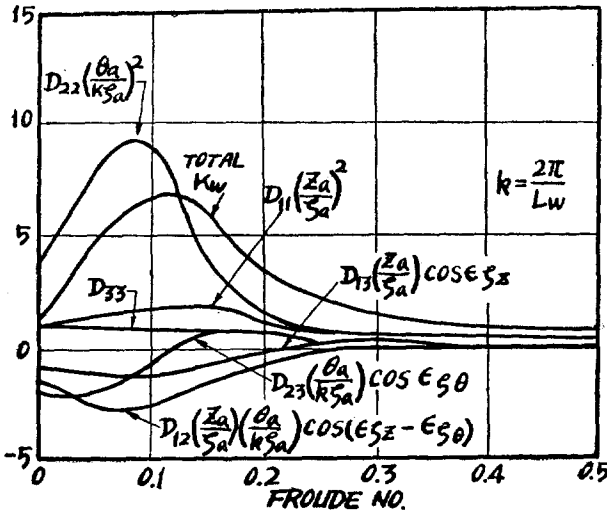


Fig. 3. Components of Coeff. of Resistance Increase in Waves $L_w/L=1$

Maruo는 抵抗增加의 모양을 더욱 알기쉽게 하기위해서 單位排水量當 抵抗增加量

$$\frac{\Delta R}{A} = \frac{1}{4\delta} \frac{B}{T} \left(\frac{h}{L} \right)^2 K_w \tag{7}$$

를 求했다. 여기서 δ 는 方形係數, T 는 吃水이다. 그가 第7回 國際水槽會議의 共同實驗에 採用된 $L_w/h=48$ 의 값을 使用해서 單位排水量當의 剩餘抵抗을 求한것이 Fig. 4이다. 또 一例로서 길이 120 m, 排水量 7,380噸의 實船이 높이 2.5 m인 向波를 받을 때의 有效馬力을 計算한 것이 Fig. 5이다. 但 摩擦抵抗은 波濤의 영향을 받지 않는다고 假定하고 Schoenherr의 係數를 使用해서 求했다.

Wang[14]은 Mariner model를 使用하여 增加抵抗係數 K_w 와 波濤反射에 對應하는 增加抵抗係數 D_{11} 을 求하는 實驗을 MIT水槽에서 하고 Maruo의 理論에 依한 計算値와 比較檢討하였다(Fig. 6). 波濤反射에 依한 抵抗

길이배의 길이와 同一한 規則波에 對한 Maruo의 計算結果는 Fig. 3과 같으며 그는 다음과 같은 結論을 主張하고 있다.

- (1) 波浪에 依한 抵抗增加는 平水中의 抵抗에는 無關係하다.
- (2) 動搖振幅이 波高에 比例한다고 하면 增加抵抗은 波高의 2乘에 比例한다.
- (3) 抵抗增加에 있어서는 縱搖의 영향은 支配的이다.
- (4) 船體에 依한 波濤의 直接的影響은 比較的 작다.
- (5) 自由縱搖週期가 自由上下動週期보다 길면 最大의 抵抗增加는 縱搖同調時보다도 多少 高速에서 일어난다.

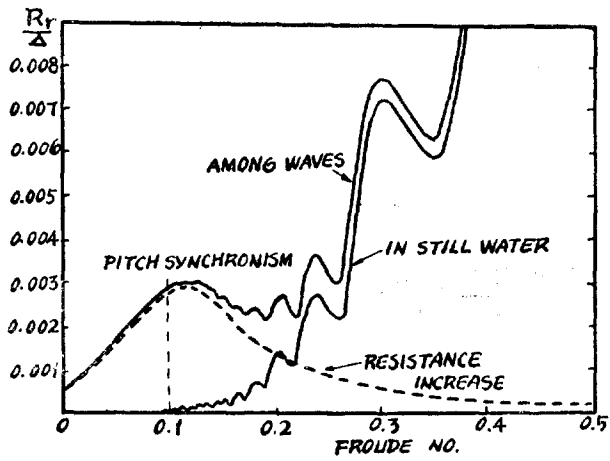


Fig. 4.

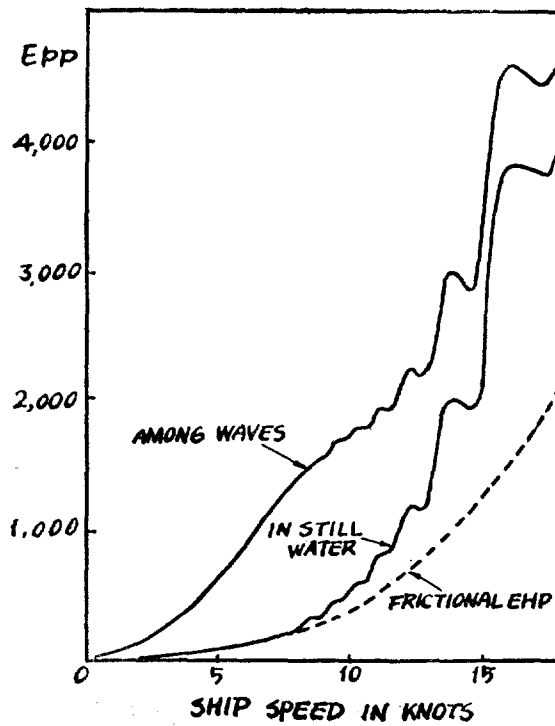


FIG. 5

Fig. 5.

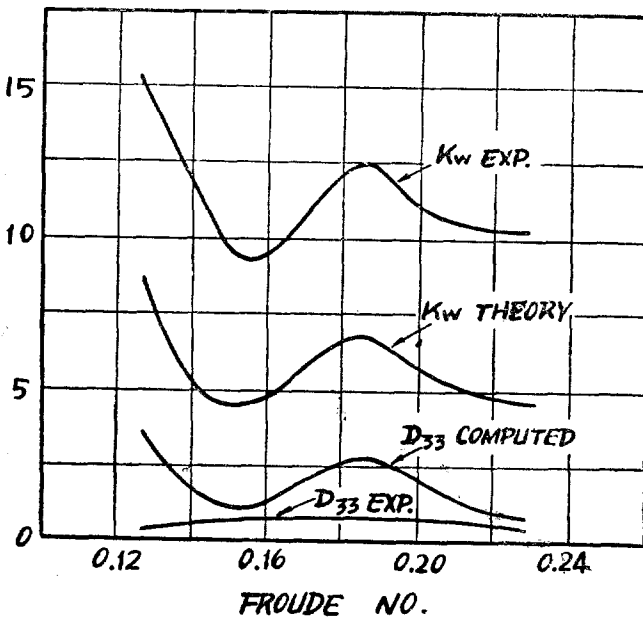


Fig. 6 Comparison of Added Resistance Coeff. between Experiment and Theory. Mariner Model $L_w=L$, $2\zeta_a/L_w=1/50$

增加가 全體의 抵抗增加量에 比較해서 매우 작다는 그의 結論은 Maruo와 一致하나 全體의 抵抗增加係數 K_w 의 實驗值가 理論值보다 매우 크다는 것은 實驗이 正確하다면 maruo의 理論이 再檢討되어야 한다는 것을 意味한다. 그러나 Maruo의 理論値는 量에서 있어서는 滿足스럽지 못하나 Froude 數에 따라서 그 變化하는 모양은 實驗과 잘 一致하였다. D_{33} 은 배의 形狀과 波濤條件 및 速度에 따라서 變하는 係數인데 Wang은 Mariner 單獨model에 對한 實驗을 하였기 때문에 배의 形狀의 D_{33} 에 미치는 影響은 調査되지 않았다.

4. 實驗的 研究

波浪中에 있어서의 抵抗試驗은 Carriage

式 Tank 와 서울大學校水槽와 같은 重力式 Tank 의 어느 것에서든 지 할 수 있다. Carriage 式 Tank 에서의 試驗에 있어서는 結果를 波濤의 size를 徑數로하고 model 速力에 對해서 抵抗을 plot 하는 形式으로 整理하는 것이 常例이며 重力式 Tank 에 있어서는 波長에 對해서 model 速力을 plot 하는 것이 普通이다.

Carriage Tank 에 있어서의 實驗은 Kent, Kempf 에 始作되어 E.V. Lewis, Korvin-Kroukovsky, Gerritsma, Pauling 等에 依해서 많이 行하여 졌다. 重力式 Tank 에 있어서의 實驗은 主로 Abkowitz, Szebechely 等에 依해서 行하여 졌다. 여기에 重力式 Tank 에서 DTMB Series 60, 0.60 CB 船型에 對해서 Szebechely 等이 行한 實驗 結果를 紹介하겠다[15].

Fig. 7 의 가장 위의 曲線은 靜水中 $Fn=0.28$ 에 對應하는 model speed 를 주는 towing weight 에 對應하는 것

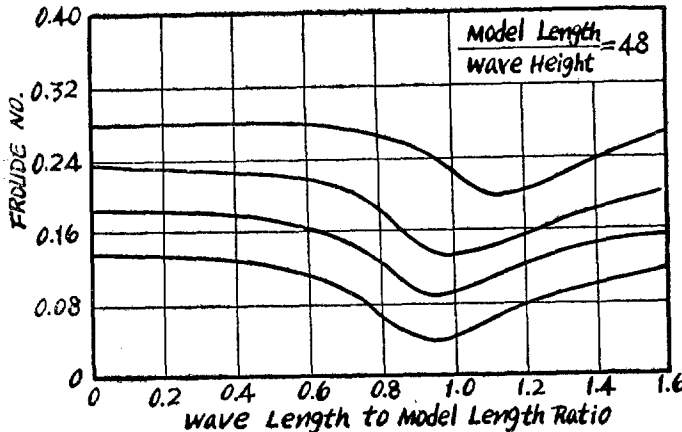


Fig. 7 Speed Reduction in Waves of Constant Height at Constant Tow Force

이다. Mariner type 에 대해서 이 F_n 은 試運轉速力 21 knots 에 對應하는 값이다.

速力의 最大減少를 주는 波濤條件은 12 ft 높이의 swell 과 類似하다. 普通 그와같은 swell 에 있어서는 定常 propeller RPM 은 그대로 維持된다고 한다. 이 實驗結果는 배의 速力이 約 15 knots($F_n=0.20$)로 떨어진 것을 나타내고 있으며 이것은 靜水中速力의 71%에 該當한다. 다음에 $F_n=0.185$ (靜水中)인 위에서부터 3 번째 曲線에 對應하는 propeller RPM 이 保持된다고 하면 15 knots 의 靜水中速力은 6.7 knots 로 떨어진다. 이 경우에는 靜水中速力의 45%에 不過하다.

이 例는 排水量噸當 低馬力船(抵速船)은 波浪中에서 高馬力의 高速船에 비해서 速力의 損失이 크다는 一般의 常識을 證明해 주고 있다. 이 例에서는 動力의 影響을 同一船型에 對해서 생각하였는데 實際에 있어서는 低馬力船은 더욱 肥大한 船型이기 때문에 波浪中에서의 速力의 損失은 더욱 클 것이다.

같은 重力式 Tank 에서의 同一船型에 對한 Gerritsma[16]의 實驗結果에 依하면 배의 速力 15 knots ($F_n=0.20$)에 對해서 model 抵抗은 靜水中에서 約 110 g 인 것이 $L_w/L=1.01$ 의 波濤에서 200 g 으로 增加하였다고 한다. 이것은 32%의 增加를 보이고 있다. 波浪中에 있어서의 速力 6.7 knots 에 對應하는 低馬力에서 抵抗의 增加는 約 160%에 達한다.

5. 直線肋骨型船의 波浪中에서의 抵抗性能

Kobayashi(小林)는 最近에 垂線間長 8.10 m, 型幅이 2 m, 吃水가 0.71 m, 總噸數 1.77 噸의 直線肋骨型漁船 神水丸의 規則波中에서의 抵抗試驗을 하고 그 結果를 西洋式船型의 漁船과 比較하고 있다[16]. 그는 靜水自航試驗狀態와 同一船型에서 向波 6 狀態, 追波 3 狀態에 對해서 波浪中 自航試驗을 實施했다. 同試驗의 結果는 Fig. 8 과 같다.

Kobayashi 는 普通船型의 底底綱漁船인 新潟丸($L=15.32$ m, $B=3.68$ m, $T=1.26$ m, $GT=18$ 噸)의 波浪中에서 引水槽試驗을 兼하고 2 船型의 波浪中에서의 推進性能을 比較하고 있다. 有效馬力과 軸馬力사이에는 船殼效率, 推進器效率, 推進器效率比 및 傳達效率等이 介在하고 있으므로 新水丸의 試驗結果와 新潟丸의 試驗結果를 그대로 比較한다는 것은 理致에 맞지 않으나 軸馬力은 有效馬力에 比例한다고 假定해서 比較檢討하는 것은 無意味하다고는 볼 수 없다.

神水丸은 $F_n < 0.30$ 에서는 어느 波長의 波濤에 對해서도 軸馬力의 增加率 $\Delta SHP/SHP_0$ 는 新潟丸의 有效馬力의 增加率 $\Delta EHP/EHP_0$ 보다 크다. 그러나 $F_n > 0.30$ 에서는 神水丸의 成績이 좋다.

그러므로 結論의으로 直線肋骨型船은 靜水中에서와 마찬가지로 波浪中에 있어서도 高速部에 있어 推進性能이 좋은 船型이라고 말할 수 있다.

直線肋骨型船의 其他 耐航性能에 對한 Kobayashi의 實驗結果를 附言해 둔다. 波浪中에서의 배의 運動은 直線肋骨船型과 같은 角型船型은 船底衝擊等의 點에서 一般의 中庸型船型보다 못하다고 생각되어 왔는데, 神水丸의 試驗結果에 依하면 pitching 이 最大가 되는 速力

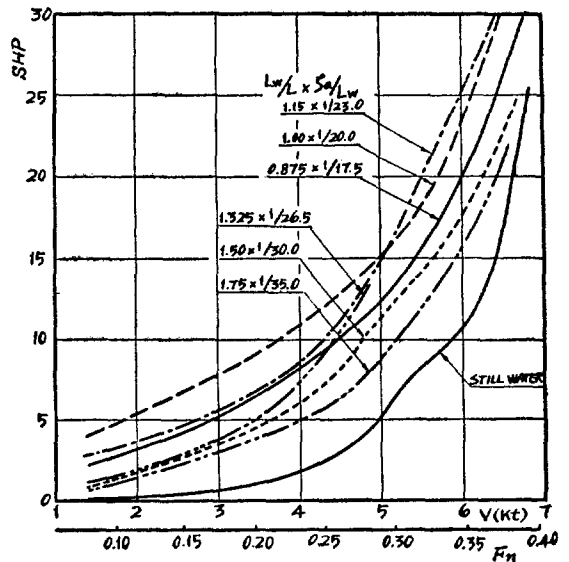


Fig. 8. SHP v.s. Speed in Waves (Sinsui Maru)

에서는 heaving 이 작아지고, 逆으로 heaving 이 最大가 되는 速力에서는 pitching 이 작아지기 때문에 船首部 上下加速度는 新瀾丸보다도 작아져 波浪中에서도 充分히 使用可能한 船型이라고 생각된다.

6. Bulbous Bow 의 波浪中에서의 抵抗性能

Bulbous Bow 의 波浪中에서의 抵抗試驗에는 Van Lammeren 의 것이 있다[17]. 여기에 그 結果를 簡單히 紹介하겠다.

實驗에 使用될 배의 要目과 狀態는 다음과 같다.

荷 重 狀 態		滿 載	輕 荷 I
L_{pp}	(m)	172.21	172.21
B , mld	(m)	22.86	22.86
T , fwd	(m)	9.73	5.21
mean	(m)	9.73	6.27
aft	(m)	9.73	7.33
Δ	(m^3)	29230	18200
δ		0.764	0.732
β		0.991	0.986
Bulb radius	(m)	2.5	2.5
Bulb area(% of A_x)		9	14
$\delta\Delta$ of bulb	(m^3)	147	147
LCB		+1.59	-1.40
radius of gyration % of L_{pp}		23.59	25.43

實驗結果는 Fig. 9, Fig. 10 과 같다

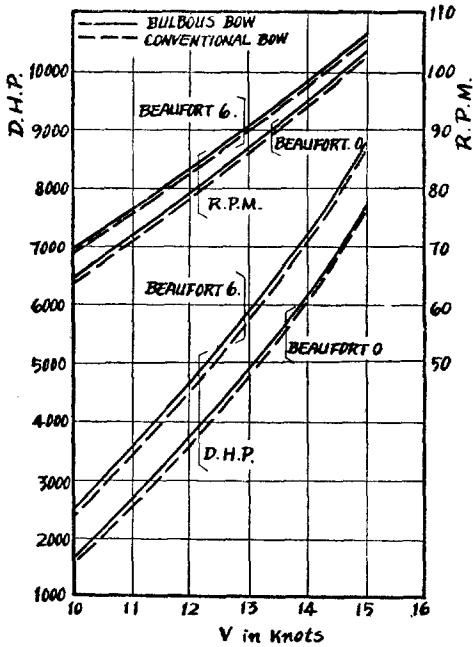


Fig. 9 Power and Propeller Revolutions for the Full Load Condition in a Beaufort 6 Sea

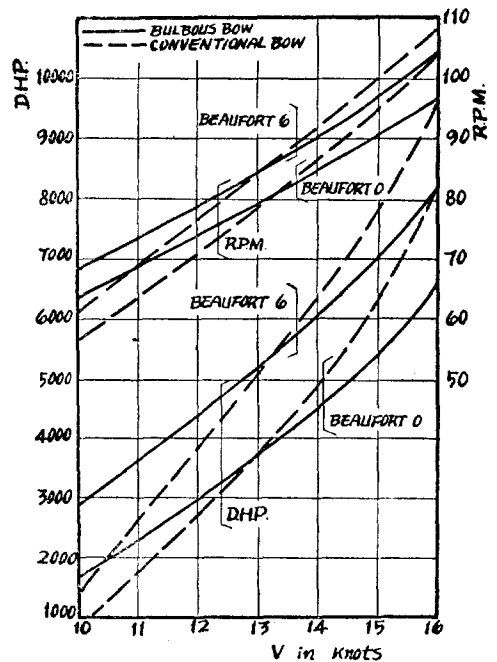


Fig. 10 Power and Propeller Revolutions for the Ballast I Condition in a Beaufort 6 Sea

供試船은 DWT 24,000 噸의 Bulkcarrer 이며 滿載狀態에서의 Bulb 面積과 浸水水中斷面積의 比는 9% 였다. Fig 9 로부터 滿載狀態에 있어서는 靜水中이나 波浪中에 있어서 Bulb 의 効果는 無視할 수 있을 程度로 작다는 것을 알 수 있다.

滿載狀態에서 7,500 馬力으로 다음 速力이 얻어진다고 한다.

	普通船首	球狀船首
Beaufort 0	14.95 knots	14.90 knots
Beaufort 6	14.3 knots	14.2 knots

Ballast I 狀態에서는 Bulb 面積은 浸水中央橫斷面積의 14% 이며 Bulb 의 効果가 波浪中에 있어서도 速力 13 knots 以上에서 顯著하게 나타나며 以下에서는 速力の 損失이 나타나며 靜水中에서보다 顯著하다. 13 knots 以上에서는 波浪中에서의 Bulb 의 利得은 靜水中보다는 多少 떨어진다.

Ballast 狀態에서 7,000 馬力으로 다음 速度가 얻어진다고 한다.

	普通船首	球狀船首
Beaufort 0	15.4 knots	16.2 knots
Beaufort 6	14.5 knots	15.0 knots

7. 結 言

Maruo 의 理論도 Wang 의 實驗에서 본바와 같이 quality 의 面에서는 매우 좋은 結果를 보여주지만 quantity 의 面에서는 完全히 距離가 멀다. 이와같은 點으로 보아 規則波中에서의 船體의 抵抗에 關한 理論的인 研究는 더욱 繼續되어야 할 것이다. 波浪中에서의 抵抗의 增加는 船舶의 運航費에 큰 影響을 끼치므로, 아직 研究가 많이 이루어지지 않은 特殊船型 및 大型 Bulbous Bow 等の 波浪中에서의 抵抗特性에 關한 實驗 및 理論的인 研究가 活潑하게 이루어질 것이 要望된다.

參 考 文 獻

- [1] T.H. Havelock, "The Resistance of a Ship among Waves," *PRS*, 161 A, 1937.
- [2] J. Kreitner, "Heave, Pitch and Resistance of Ships in Seaway," *Trans. INA*, vol. 81, 1939.
- [3] T.H. Havelock, "The Pressure of Water Waves upon a Fixed Obstacle," *PRS*, 175 A, 1940.
- [4] W.R. Jacobs & E.V. Lewis, "Correlation of Resistance Tests on Ship Models in Short Waves," *SIT-ETT Note 222*, prepared for 10th ATTC, Cambridge, Mass., May 1953.
- [5] T.H. Havelock, "The Drifting Force on a Ship among Waves," *Phil. Mag.*, vol. 33, 1942.
- [6] M. St. Denis, "On Sustained Sea Speed," *Trans. SNAME*, vol. 59, 1951.
- [7] J.H. Michell, "The Wave Resistance of a Ship," *Phil. Mag.*, vol. 45, 1898.
- [8] T. Hanaoka, "Non-uniform Wave Resistance," *Journal of Zosen Kiokai*, vol. 94, 1954.
- [9] 花岡達郎, "波浪中の船の運動と造波抵抗理論," 日本造船協會論文集, 第98號, 1956.
- [10] 花岡達郎, "波浪中の船の運動の計算について," 日本造船協會論文集, 第100號, 1957.
- [11] H. Maruo, "The Theory of the Wave Resistance of a Ship in a Regular Seaway," *Bulletin of the Faculty of Engineering, Yokohama National University*, vol. 6, 1957.
- [12] 丸尾 孟, "波浪中の船體抵抗增加に關する研究(第1報)," 日本造船協會論文集, 第101號, 1957.

- [13] G. Vossers & H. Stam, "Resistance, Propulsion and Steering of Ships, C: Behavior of Ships in Waves," Haarlem, 1962.
- [14] S. Wang, "Experiments on Added Resistance of a Ship Among Waves," *Report No. 65-1, Dept. of Naval Arch. and Marine Engineering, M.I.T.*, Contract No. DSR 5054, 1965.
- [15] V.G. Szebehely, M.D. Bledsoe and G. P. Stefun, "Scale Effects in Seaworthiness," *11th ATTC, DTMB*, Sept. 1956, also *DTMB Report 1070*, July. 1956.
- [16] 小林 務, "和船型漁船の推進性能並びに耐航性能に関する水槽試験成績について," 漁船研究技報, 第21巻第4號(通巻44號), 1967.
- [17] W.P.A. Van Lammeren & F.V.A. Pangalila, "Research on Bulbous Bow Ship. Part IIB. Behavior of a 24,000 DWT Bulkcarrier with a Large Bulbous Bow in a Seaway," *ISP*, vol. 13, No.137, Jan. 1966.