

## 論 文

大韓造船學會誌  
第17卷 第1號 1980年 3月  
Journal of the Society of  
Naval Architects of Korea  
Vol. 17, No. 1, March 1980

## 有限水深에서의 船型計劃

金 曉 哲\* · 徐 廷 天\*\*

## A Study on the Characteristics of wave Resistance and Hull Form obtained at Finite Water Depth

Hyochul Kim\* · J.C. Seo\*\*

## Abstract

From the singularity distribution which obtained by minimum wave resistance condition, optimum hull form is obtained by stream line tracing method as Inui and Pien did. Thus obtained hull form has a extruded bottom along a keel line. Therefore the hull form must be modified to have flat bottom. This modification process is conducted by putting a fictitious bottom.

It is found out that the wave resistance does not significantly alter at design speed even though the hull form has remarkably changed at the bottom. Therefore flattening the bottom by the effect of depth may be more rational for practical hull form design than ordinary manual hull-form modification.

## 記 號

 $C_w$ ; 造波抵抗係數 =  $R_w \frac{1}{2} \rho U^2 S$  $d$ ; 水深 $g$ ; 重力 加速度 $F_n$ ; Froude數 $L$ ; 船體의 길이 $l$ ; 船體의 길이의 半 =  $L/2$  $M$ ; doublet의 모우멘트 $n(n_x, n_y, n_z)$ ; 外向 法線 方向 單位 vector $R_w$ ; 造波抵抗 $\bar{q}$ ; 流動의 速度 vector $S$ ; 船體의 浸水表面 或은 浸水表面積 $S_0$ ; 特異點 分布面 $U$ ; 船舶 或은 特異點의 速度 $(u, v, w)$ ; 攪亂速度成分 =  $V\phi$  $(x, y, z)$ ; 3次元 座標 $(x_0, y_0, z_0)$ ; 特異點의 位置座標 $(R, \theta, x)$ ; 圓筒座標系 $(\alpha, \beta, \gamma)$ ; doublet軸의 direction cosine $(\xi, \eta, \zeta)$ ;  $(x, y, z)$ 의 無次元量 =  $(x/l, y/l, z/l)$  $\eta_s$ ; side source의 分布面 $\eta_B$ ; bottom doublet의 分布面 $\sigma$ ; source의 세기 $\mu$ ; Rayleigh의 假想係數 $\rho$ ; 流體의 密度 $\Phi$ ; 流動의 速度 potential $\phi$ ; 攪亂速度 potential

## 1. 緒 言

造波抵抗이 적은 船型을 開發하려는 研究는 이미 많은 學者들에 依하여 理論 및 實驗의 으로 遂行되어 왔

接受日字: 1980年 3月 4日

\*正會員, 서울大學校 工科大學

\*\*正會員, 서울大學校 大學院

다.

특히 Inui는 1953年 變分原理를 適用하여 주어진 幾何學的 拘束條件下에서 造波抵抗이 最小가 되는 船型에 等價한 一聯의 特異點系를 求하고 얻어진 特異點系에 依한 流線을 追跡함으로써 對應되는 最適船型을 理論的으로 決定하는 所謂, 流線追跡法을 提案하였다.<sup>1)</sup> 그 後, 流線追跡法은 Inui<sup>2,3)</sup> 및 Pien<sup>4)</sup>等에 依하여 繼續的으로 進展되어 最近에는 거의 實用化의 段階에 이르고 있으나 이러한 方法에 依하여 얻어진 理論船型은 船底의 처짐으로 因하여 實用船型에 適用하기 爲하여는 번거로운 純整作業을 거처야만 한다는 缺點을 갖고 있다.<sup>5)</sup>

本 論文의 目的은 無限水深에서의 問題로 局限하여 使用되고 있는 流線追跡法을 假想된 有限水深에서의 問題로 取扱하고 有限水深에서 船型을 流線追跡할때 나타나는 船型의 平底化 現象을 利用하여 Inui等의 方法에서 나타나는 船底의 처짐이라는 缺點을 改善하려는데 있다. 即, 有限水深에서는 水底의 效果에 依하여 船底가 平底化되므로 이때 求한 船型의 造波抵抗과 큰 差異가 없다고 假定하면, 앞서 말한 流線追跡法의 缺點을 相當히 補完할 수 있으며 大部分의 排水量型 船舶들이 運航되고 있는 比較의 낮은  $F_n$ 에서는 適切한 假想水深을 取하여 이러한 假說의 適用될 可能性을 確認하고자 하였다.

이를 爲하여 假想的으로 設定한 水深의 變化에 따른 船型의 變化와 이들 變化된 船型을 船體의 浸水表面에 特異點을 分布함으로써 나타내고 無限水深에서의 造波抵抗을 計算하였다. 數值計算은 理論值와 實驗值가 알려져 있는 Inuid S201<sup>2)</sup>과 Pienoid M.S. A-12<sup>5)</sup>를 擇하였다.

2. 速度 potential

本 論文에서 使用하고 있는 基本的인 座標系는 Fig. 1과 같이 船體와 함께 移動하는 直交座標系(x, y, z)이다.

流體는 非粘性, 非壓縮性인 理想流體, 流動은 非回轉運動이라고 假定하면, Laplace's eg을 滿足하는 速度 potential  $\phi$ 가 存在하고 流動의 速度 vector  $\vec{q}$ 와의 사이에는  $\vec{q} = \nabla\phi$ 라는 關係가 있다.

船體가 靜水中을 x軸의 陽方向으로 均一한 速度 U로 運動하는 경우, 速度 potential  $\phi$ 은

$$\phi = -Ux + \phi \tag{2-1}$$

와 같은 꼴로 表示할 수 있다. 여기에서  $\phi$ 는 船體運動

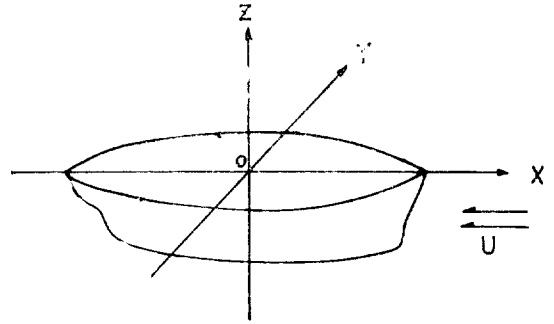


Fig. 1. Coordnate System

에 依한 攪亂速度 potential이며 이는 船體 表面上 혹은 그 內部에 特異點을 分布시킴으로써 얻을 수 있다. 따라서 特異點 分布面을  $S_o(x_o, y_o, z_o)$ 라고 하면, 3次元 source分布에 依한 攪亂速度 potential의 一般式은

$$\phi = \int_{S_o} \frac{\sigma}{4\pi} \left( -\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) ds + \frac{K_o}{4\pi^2} \int_{S_o} \sigma ds \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2\theta d\theta \times \int_0^{\infty} \frac{\exp\{K[(z+z_o)+i\bar{\omega}]\}}{K - K_o \sec^2\theta + i\mu \sec\theta} dK \tag{2-2}$$

단,  $r_1^2 = (x-x_o)^2 + (y-y_o)^2 + (z-z_o)^2$

$$r_2^2 = (x-x_o)^2 + (y-y_o)^2 + (z+z_o)^2$$

$$K_o = g/U^2 = 1/F_n^2$$

$$\bar{\omega} = (x-x_o)\cos\theta + (y-y_o)\sin\theta \tag{2-3}$$

이 되고 doublet를 分布했을 경우

$$\phi = - \int_{S_o} \frac{M}{4\pi r_1^3} [(x-x_o)\alpha + (y-y_o)\beta + (z-z_o)\gamma] dS + \int_{S_o} \frac{M}{4\pi r_2^3} [(x-x_o)\alpha + (y-y_o)\beta + (z-z_o)\gamma] dS - \frac{iK_o}{4\pi^2} \int_{S_o} M ds \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2\theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{\alpha\cos\theta + \beta\sin\theta - i\gamma}{K - K_o \sec^2\theta + i\mu \sec\theta} \times \exp\{K[(z-z_o)+i\bar{\omega}]\} K dK \tag{2-4}$$

이 된다.<sup>6,7)</sup>

(2-2), (2-4)式에서 求한 速度 potential  $\phi$ 를 造波抵抗公式

$$R_w = \lim_{\mu \rightarrow 0} \mu \rho \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\phi\phi_z)_{z=0} dx dy \tag{2-5}$$

에 代入하면 無限水深에서의 造波抵抗은 source分布의 경우

$$R = \frac{\rho K_o^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} (P^2 + Q^2) \sec^3\theta d\theta \tag{2-6}$$

단,  $P + iQ = \int_{S_o} \sigma \cdot \exp\{K_o[i(x_o\cos\theta + y_o\sin\theta)\sec^2\theta + z_o\sec^2\theta]\} dS$

$$\tag{2-7}$$

이 되고 doublet分布의 경우에는

$$R = \frac{\rho K_o^4}{\pi} \int_0^{\pi/2} (P_1^2 + Q_1^2) \sec^7\theta d\theta \tag{2-8}$$

단,  $P_1 = \int_{S_o} M [-(\alpha\cos\theta + \beta\sin\theta)\sin(K_o\bar{\omega}\sec^2\theta)]$

$$+ a \cos(K_0 \omega \sec^2 \theta) \exp(K_0 z_0 \sec^2 \theta) dS \quad (2-9)$$

$$Q_1 = \int_{S_0} M [(\alpha \cos \theta + \beta \sin \theta) \cos(K_0 \omega \sec^2 \theta) + \alpha \sin(K_0 \omega \sec^2 \theta) \exp(K_0 z_0 \sec^2 \theta)] dS \quad (2-10)$$

를 얻을 수 있다.<sup>7)</sup>

### 3. 有限水深에서의 流線追跡

船型과 特異點系와의 對應을 생각할 때, 보통 排水量型 船舶의 運航速度  $F_n = 0.15 \sim 0.35$ 에서는 二重模型 近似를 使用할 수 있음이 알려진 바 있다.<sup>1,2)</sup>

有限水深의 경우에 二重模型 近似를 使用하면 自由表面條件뿐만 아니라 水底에서의 境界條件도 滿足시켜 주어야 하므로, 速度 potential은 無限個의 image에 對한 速度 potential의 疊으로 表示되며 均一한 速度  $U$ 로 運動하고 있는 特異點系에 依하여 表現되는 船型은 流線方程式

$$-\frac{dx}{-U+u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \quad (3-1)$$

으로부터 追跡되어질 수 있다.

### 4. 特異點 分布에 依한 船型 表現

自由表面上에서 運動하고 있는 船舶 周圍의 流動을 浸水表面上의 source 分布로 表示할 경우 船體 表面에 分布된 source의 세기  $\sigma$ 는 Fredholm의 2種 積分方程式

$$U \cdot nx = \frac{1}{2} \sigma - \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + H \right] dS \quad (4-1)$$

$$\text{단, } H = -\frac{K_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{\exp\{K[(z+z_0)+i\omega]\}}{K - K_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dK \quad (4-2)$$

의 解로써 주어진다.<sup>6,8,9)</sup> 여기서  $\sigma$ 는 船體의 形狀뿐만 아니라  $F_n$ 의 函數이므로 (4-1)식을 풀기는 매우 어렵다. 따라서 二重模型 近似( $K_0 \rightarrow \infty$ )를 利用하면  $\lim_{K_0 \rightarrow \infty} H = \frac{2}{r_2}$ 이므로 (4-1)식을 바꿔 쓰면

$$U \cdot nx = \frac{1}{2} \sigma - \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left[ \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right] dS \quad (4-3)$$

이 얻어진다.

그런데 一般的인 船舶의 形狀은 매우 複雜하므로 (4-3)식을 數值的으로 計算하는 데 많은 어려움이 있다.<sup>8)</sup>

따라서 充分히 細長한 船舶의 경우에는 Kan의 方法<sup>10)</sup>을 利用하면 (4-3)식을 다음과 같은 簡單한 積分方程式으로 變形할 수 있다.

$$P(x, \theta) = 2U_n(x, \theta) + \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} P(x, \theta') \bar{K}(x; \theta, \theta') d\theta' \quad (4-4)$$

단,  $P = \sigma \cdot F'$

$$F' = \sqrt{1 + R_x^2 + (R_\theta/R)^2}$$

$$R_x = \frac{\partial}{\partial x} R, \quad R_\theta = \frac{\partial}{\partial \theta} R$$

$$\bar{K} = \left[ \{R' \cos(\theta - \theta') - R + R' \sin(\theta - \theta') \cdot R_\theta / R\} / R_M + \{R' \cos(\theta + \theta') - R + R' \sin(\theta + \theta') \cdot R_\theta / R\} / R_P \right] 2R' \quad (4-5)$$

$$R_M = R^2 + R'^2 - 2RR' \cos(\theta - \theta')$$

$$R_P = R^2 + R'^2 - 2RR' \cos(\theta + \theta')$$

$$U_n = -UR_x / F'$$

여기서  $(R, \theta, x)$ 는 圓筒座標系로써 直交座標系  $(x, y, z)$ 와는 다음과 같은 關係가 있다.

$$x = x, \quad y = R \cos \theta, \quad z = R \sin \theta \quad (4-6)$$

### 5. 計算結果 및 考察

理論船型으로서 잘 알려져 있는 Inui船型 S 201을 採擇하여 計算을 實施함으로 假想水深을 設定하므로써 얻어지는 船型의 變化를 確認하고 그들의 造波抵抗의 變化를, 特異點 分布方式을 바꾸어 가며 計算하여, 確認하였다. 또 理論船型으로서 實存船型의 船型을 改良하기 위하여 流線追跡된 바 있는 MSA 12<sup>1)</sup>을 擇하여 같은 計算을 實施하였다. 이 船型은 船底의 吃水 現象을 줄이기 위하여 bottom doublet sheet를 두어 상당한 效果를 거두고 있으나 充分히 不합으로 假想水深을 設定하여 流線追跡하므로써 좀더 實用 船型에 가깝게 平底化됨을 보이고 造波抵抗의 變化를 計算하였다.

#### Inuid S 201의 船型變化

Inuid S 201을 定義하는 船體中心線面에 線形的 特異點 分布를 使用하여 船型을 流線追跡하면 Fig. 2a와 같은 船型을 얻게 된다. 이에 對하여 같은 特異點 分布를 使用하되 假想된 水深을 設定하여 有限水深에서와 같이 二重模型 近似로 船型을 流線追跡하므로 Fig. 2b Fig. 2c 및 Fig. 2d의 船型을 얻었다. 이들 結果를 보면 假想水深을 船底에 가깝게 둘 수록 平底化 現象이 두드러지게 나타나는 것을 確認할 수 있다. 즉 Fig. 2a와 Fig. 2d를 比較하여 보면 水深이 0.1 L에 있다고 假定하였을 때 船底의 平底化로 인한 吃水의 減少는 Fig. 2a에 比하여 12.3%에 達하는 것을 確認할 수 있었다. 또 船底의 平底化로 인한 船幅의 變化가 나타나게 되어 水線面의 變化가 隱件된다. 이 變化는 平底化 效果에 比하여 볼 때 크지 않으며 Fig. 2a와 Fig. 2d를 比較하여 確認할 수 있는 바와 같이 水線面의 entrance 部에서는 變化가 적고 中央部에서 相對적으로 크게 보이나 船幅의 增加가 5.7% 정도에 지나지 않음을 確認할 수 있다. 이러한 點들로 미루어 볼 때 造波抵抗의 變化가 크지 않을 것이 豫測된다.

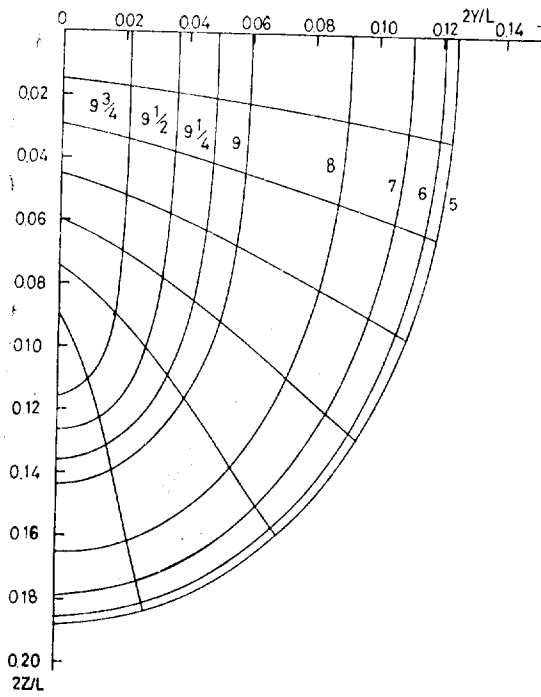


Fig. 2a. Body plan, Inuid model ( $d/L=\infty$ )

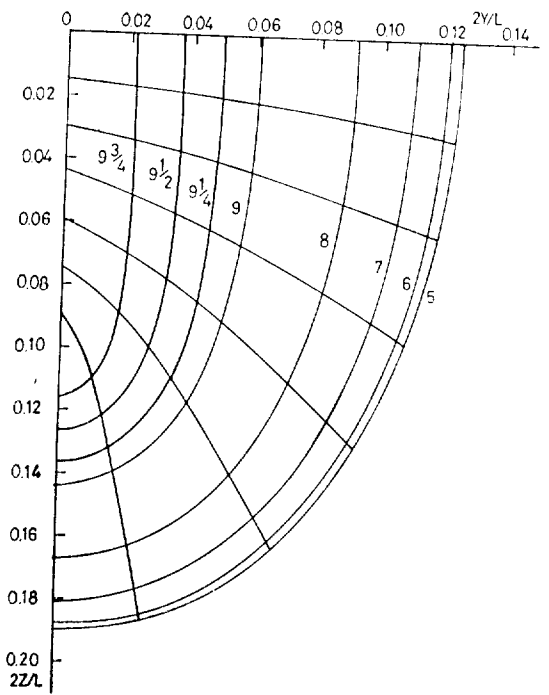


Fig. 2c. Body plan, Inuid model ( $d/L=0.15$ )

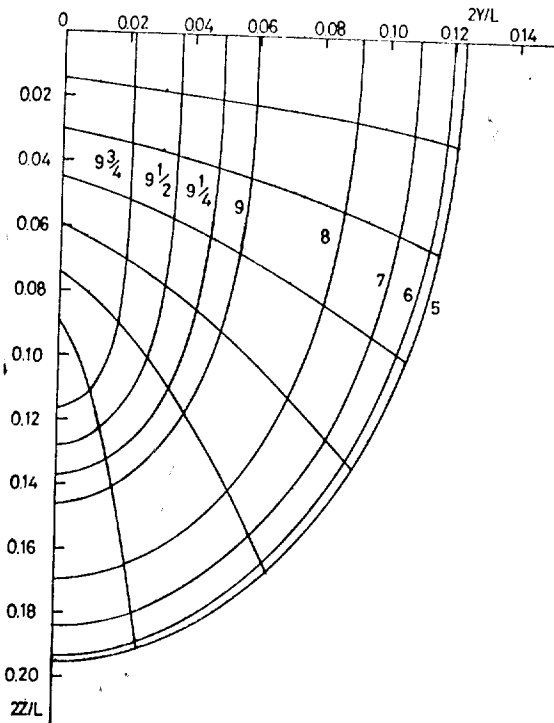


Fig. 2b. Body plan, Inuid model ( $d/L=0.2$ )

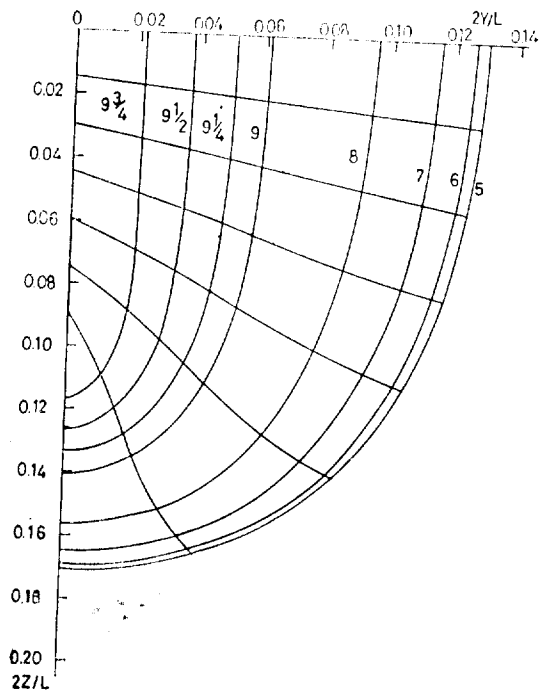


Fig. 2d. Body plan, Inuid model ( $d/L=0.1$ )

**Inuid S201의 平底化로 因한 造波抵抗의 變化**

Inuid S201(Fig. 2a)와 平底化된 船型(Fig. 2d)의 造波抵抗의 變化를 알아보기 爲하여 (2-6)式을 使用하여 造波抵抗을 計算하였다. Inuid S201에 對하여서는 中心線面에 特異點을 分布시킨 Inui方式과 船體表面에 特異點을 分布시키어 Kan의 方法을 使用하여 計算하였으며 平底化된 船型에 對하여서는 Kan의 方法에 依한 計算만을 實施하였다. 이들 結果는 Fig. 3.에 圖示하였다. Fig. 3에 依하면 特異點 分布方式이 變化한 경우에 計算된 造波抵抗은  $F_n$ 가 클수록 큰 差異를 보이고 있으나  $F_n < 0.35$ 의 區間에서는 定性的으로 보아 差異가 없다고 볼 수 있음을 알 수 있다. 또 Fig. 2a와 Fig. 2d의 船型에 對하여 計算된 造波抵抗值를 比較하면 船型이 變化로 因한 抵抗의 變化는  $0.15 < F_n < 0.35$  範位에서 無視될 수 있음을 보이고 있다. 이러한 特徵이 一般的으로 成立된다면 假想水深을 設定하여 有限水深에서의 船型을 流船追跡하여 求하므로 實用성이 높은 船型을 求하고 造波抵抗은 船型計劃法을 活用하여 얻어진 最適船型의 無限水深에서의 造波抵抗을 使用할 수 있을 것이 豫測된다.

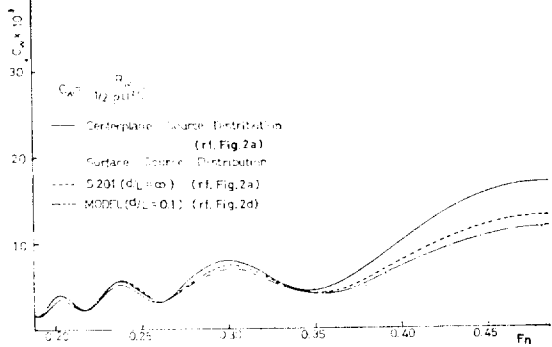


Fig. 3. Wave resistance curves, Inuid models

**Pienoid MSA-12의 船型의 變化**

Fig. 4a로 보인 船型은 前述한 바와 같이 船型을 改良하기 爲하여 最少 造波抵抗을 갖는 最適條件下에서 流線 追跡되어 얻어진 船型이다. 이 船型을 나타내는 特異點分布를 그대로 使用하고 假想水深을  $d/L=0.08$ 에 設定하면 流線追跡되는 船型은 有限水深의 影響에 依하여 底平化되어 Fig. 4b와 같이 된다. 이들 두 船型을 比較하여 보면 設定된 假想水深에 依하여 船底가 平底化됨으로 因하여 吃水의 減少가 17.3%에 達하는 것을 確認할 수 있다. 또 Inuid의 境遇에서와 같이 水深의 影響을 받아 水線面의 形態에 變化가 이루어지나 船幅의 增加는 주어진 最適船型의 船幅에 比하여 3% 정도임을 알 수 있다. 그리고 餘他的 幾何學의 特性의

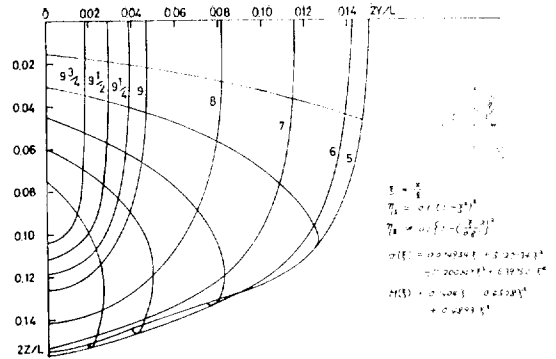


Fig. 4a. Body plan, Pienoid ( $d/L=\infty$ )

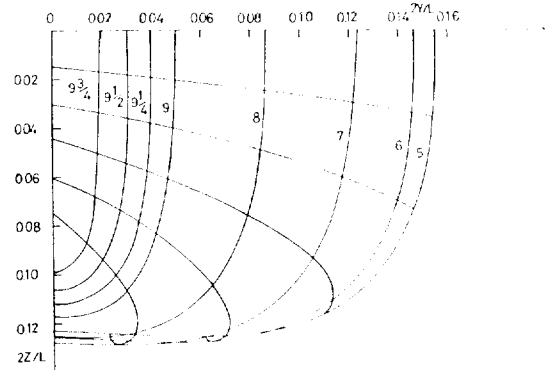


Fig. 4b. Body plan Pienoid ( $d/L=0.08$ )

變化를 살펴보면 다음과 같다.

	Pienoid MSA 12	Modified Hull Form
$C_w$	0.623	0.633
$C_b$	0.475	0.545
$C_p$	0.607	0.619
$C_M$	0.785	0.880
Wetted surface	1	0.883

이에 依하면 造波抵抗에 影響을 주는  $C_w$ 와  $C_p$ 의 變化는 크지 않으며  $C_b$ 의 變化는 큰 것으로 나타나 있다. Fig. 4a와 Fig. 4b의 比較에서 알 수 있는 바와 같이  $C_b$ 의 變化는 排水量의 變化로 因한 것이 아니라 吃水의 變化에 依한 것임을 알 수 있다. 이러한 點들을 생각하면 船型의 主要한 變化는 造波抵抗에 큰 影響을 미치지 못하는 船底部에서 이루어 졌음을 알 수 있다. 따라서 船型의 變化로 因한 造波抵抗의 增加는 크지 않을 것으로 豫測된다. 또 船底의 平底化로 因하여 浸水表面積이 12%程度 減少되므로 多少의 抵抗 增加는 摩擦抵抗의 減少로 相衰될 수 있을 것으로 보여진다.

**Pienoid 船型의 平底化로 因한 抵抗의 變化**

最適條件에서 얻어진 船型에 對하여 型型을 定義하

는 특異點系를 使用하여 (2-6)式과 (2-8)式에 依한 造波抵抗을 計算하면 Fig. 5의 實線 (A)와 같다. 여기서 從來의 船型計劃法에서와 같이 bottom doublet은 造波抵抗에 미치는 影響이 작다고 보아 이를 除外하고 計算하면 破선 (B)로 造波抵抗이 表現된다. 이 두 抵抗曲線으로부터 bottom doublet의 影響은 設計速度 近處에서 造波抵抗曲線의 hollow와 hump의 位置에 變化를 가져오므로 充分한 檢討없이 除外시켜서는 造波抵抗의 特性變化를 잘 못 判斷할 수 있음을 보이고 있다. 따라서 이러한 特性變化를 確認하기 爲하여서는 繼續된 理論 및 實驗的 研究가 이루어져야 되겠다.

船體表面에 特異點을 分布시키고 Kan의 方法에 依하여 造波抵抗을 計算하면 Fig. 4a의 船型에 對하여 點線 (C)로 그리고 Fig. 4b의 船型에 對하여 一點鎖線(D)로 表現되는 造波抵抗을 얻게 된다. 抵抗曲線 (B), (C), (D)를 比較하여 보면 設計速度( $F_n=0.2673$ ) 近處에서 抵抗의 變化를 無視할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 理論船型의 設計에서 假想的인 깊이를 導入하여 有限水深에서 船型을 流線追跡하여 얻고 造波抵抗은 從來에 方法에서와 같이 無限水深에서 最適條件을 滿足하도록 計劃된 船型의 造波抵抗으로서 使用할 수 있을 것이 期待된다.

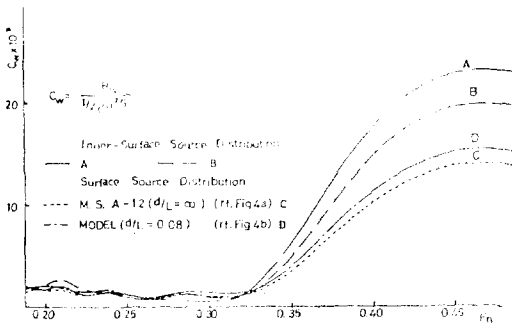


Fig. 5. Wave resistance curves, Pienoid models

### 5. 結 言

以上에 言及한 바들에 依하면 最少造波抵抗을 갖는 船型은 無限水深에서 遂行하고 그 造波抵抗을 求하였을 때 그 抵抗은 設計速度近處에서, 假想水深을 導入하여 有限水深에서 流線追跡하여 얻어지는 平底化된 船型의 造波抵抗과 같다고 볼 수 있다. 따라서 이 假定은 理論船型開發에 活用될 수 있을 것으로 생각되며 實驗的 研究를 通하여 뒷받침되어야 하겠다.

### 後 記

本 研究는 現代 group이 서울大學校 工科大學 造船

工學科에 기증한 教授研究活動基金의 뒷받침으로 이루어진 것이며 그 中間結果가 文獻(11)로 發表된바 있음을 밝힙니다.

### 參 考 文 獻

1. Inui, T., "A New Theory of Wave-Making Resistance Based on the Exact Condition of the Surface of Ships." 日本造船協會論文集, 93號, 1953
2. Inui, T., "Study on Wave-Making Resistance of Ships," S.N.A.J. 60th Anniversary Series, Vol. 2, 1957
3. Inui, T. and Kajitani, H., "Hull Form Design, It's Practice and Theoretical Background." *International Seminar on Theoretical Wave Resistance*, Tokyo, Japan, 1976
4. Pien, P.C. "The Application of Wave-Making Resistance Theory to the Design of Ship Hull with Low Total Resistance", *5th Symposium on Naval Hydrodynamics* O.N.R., 1964
5. 卞奎鍾, 洪性完, "流線追跡法에 依한 Liner船型의 改良", 大韓造船學會誌, Vol. 7, No. 2, 1970
6. Kostyukov, A.A., "Theory of Waves and Wave Resistance", Effective Communications Inc., Iowa City, 1968
7. Lunde, J.K., "On the Linearized Theory of Wave Resistance for Displacement Ship in Steady and Accelerated Motion", *Trans. of S.N.A.M.E.*, 1951
8. Hess, J.L. and Smith, A.M.O., "Calculation of Non-Lifting Potential Flow about Arbitrary Three Dimensional Bodies", *Journal of Ship Research*, Vol. 8, No. 2, 1964
9. Breslin, J.P. and King Eng., "Calculation of the Wave Resistance of a Ship Represented by Sources Distributed over the Hull Surface", *International Seminar on Theoretical Wave Resistance*, Ann Arbor, 1963
10. Kan, M., "Calculation of Non-Lifting Potential Flow about Ship Hulls", *Selected Papers from Journal of S.N.A.J.*, Vol. 9, 1972
11. Kim, H. and Seo, J.C., "Wave Resistance of Double Model in Finite Depth and its Application to Hull Form Design", *Workshop on Wave Resistance Computations*, Bethesda, 1979