

論 文

大韓造船學會誌
第19卷 第4號 1982年 12月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 19, No. 4, December 1982

船體中心線面에 分布된 特異點系로부터 얻어지는 最少造波抵抗船型과 그 應用

金 曉 哲* · 玄 汎 洙**

Minimum Wave Resistance Hull Form Derived from Center Plane Source Distribution and its Application to Hull Form Design

by

Hyochul Kim* B.S. Hyun**

Abstract

Developing a minimum wave resistance hull form which is satisfying the given requirements such as displacement and speed is one of the important problems in ship hydrodynamics. The theoretical approach conducted by Pien was successful in developing an optimized hull form, however, which can not be applied directly to practical hull form without manual lines fairing process.

To avoid this difficulty, source distribution which arrived after the optimization was put into a fictitious restricted channel and as a result practicably modified hull form was derived by stream line tracing. The wave resistance of the hull thus obtained was calculated by solving the simplified integral equation suggested by Kan. The resistance at design point is almost same with that of the original hull which was represented by source distribution on vertical rectangular center plane. It is therefore recommended to use the derived hull form for the hull which obtained after manual lines fairing process at Pienoid method.

Further researches both in theory and experiment are necessary before this concept is put into practical application.

序 言

船舶의 抵抗이 最少가 되는 船型을 찾으려는 勞力은 여러 研究者에 의하여 이루어져 왔다. 특히 造波抵抗을 最少로하는 船型을 求하므로써 最少抵抗이 되는 船型을 얻을 수 있으리라는 생각이 이들 研究의 主眼點이 되어 왔다.

船舶의 設計條件이 주어졌을 때 最少의 造波抵抗을 갖으면서 設計條件을 充足하는 船型을 얻는 것이 研究의 目的이 있다. 理論的 方法의 하나로서 幾何學的인

條件을 充足시키면서 最少造波抵抗이 되는 特異點 分布를 造波抵抗理論과 變分原理를 活用하여 求하고 流線道跡으로 船型을 求하는 方法이 使用되어 왔다. 이러한 方法으로 얻어지는 船型은 一般的으로 橫斷面의 形態가 實用化하기 어려운 程度로 船底가 밑으로 치지게 된다. 따라서 이를 完化하기 爲하여 船體中心線面을 特異點 分布面으로 생각하는 Inui法 대신에 船側가 사이에 分布面을 두고 船底에 doublet分布面을 두는 Pienoid法이 提案된 바 있었다. 이 경우에도 實用化하기 위하여서는 船舶排水量의 길이 方向分布와 水線面의 形態를 그대로 維持시키면서 順整作業을 통하여 平

接受日字: 1982年 9月 10日

* 正會員, 서울大學校 工科大學

** 正會員, 韓國機械研究所 大德船分所

底化 시키는 어려움이 남아있게 된다.

特異點系가 制限水域內에 놓여지게 되면 側壁이나 바닥에서의 境界條件을 充足시켜야 하므로 流線의 變化가 일어나게 된다. 無限水域에서 最少造波抵抗을 갖는 特異點系를 制限水域內에 놓고 流線追跡을 實施하면 船型은 無限水域에서 얻어지는 船型과는 달리 幾何學的 條件을 維持하며 平底化된 船型을 얻을 수 있게 된다. 이렇게 얻어진 船型이 손으로 이루어지는 順整作業에 의하여 얻어지는 船型에 對等한 效果를 줄 수 있다던 먼저다음 順整作業을 省할 수 있게 될 것이다.

이를 確認하기 爲하러 無限水域에서 얻어진 最少造波抵抗船型의 造波抵抗을 計算하고 制限水域內에서 流線追跡되어진 平底化된 船型의 無限水域에서의 造波抵抗을 計算하여 比較하였다. 造波抵抗을 計算함에 있어서는 流線追跡으로 얻어진 船型을 船體表面에 分布된 特異點系로 表現하고 그를 造波抵抗 計算에 使用하였다.

이 方法으로서 順整作業을 省할 수 있는 利點은 있으나 特異點分布를 制限水域內에 두고 境界條件을 充足시키기 爲한 計算에 많은 時間이 所要되므로 Piennoid 法을 使用하는 代身에 Inuid法을 써서 特異點 分布를 決定하고 그 有用性을 判定코져 하였다.

計算結果로부터 船體中心線面에 分布된 特異點系를 活用하여서도 最少 造波抵抗이 되며 順整作業 없이 實用化될 수 있는 船型을 얻을 수 있는 可能性이 確認되었다.

理論的 考察

造波抵抗의 船型理論

船體와 함께 移動하고 있는 直角座標系를 使用하고 流體는 理想流體다 하였을 때 x 축의 양의 方向으로 U 의 速度로 移動하고 있는 船體 周圍의 正常流動을 나타내는 速度 potential ϕ 는 (1)式으로 表示된다.

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

ϕ 를 船體의 運動에 依한 速度 potential이라 할 때 自由水面과 無限 깊이에서의 境界條件을 充足시키는 船體中心線面에 分布된 特異點系에 對하여 特異點의 單位面積當 세기를 m 이라하면 (2)式이 얻어진다.

$$\phi = \int_{-l}^l \int_{-\tau_0}^0 \left(\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + y^2 + (z+z_0)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + y^2 + (z-z_0)^2}} \right) m dx_0 dz_0 + \frac{K_0}{4\pi^2} \int_{-l}^l \int_{-\tau_0}^0 m dx_0 dz_0 \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \times$$

$$\int_0^\infty \frac{\exp K[(x-f) + i\tilde{w}]}{K - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dK \tag{2}$$

여기서 x_0, y_0, z_0 는 特異點의 座標이며 l 은 船船 길이 의 半을 나타내며 T_0 는 特異點의 分布 깊이이다. 그리고 \tilde{w} 는 (3)式의 關係를 갖는 값이다.

$$\tilde{w} = (x-x_0) \cos \theta + y \sin \theta \tag{3}$$

또 自由波는 (4)式으로 표현된다.

$$\zeta = -\frac{2}{\pi} \int_{-l}^l m dx_0 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sec \theta \cos(k_0 \tilde{w} \sec^2 \theta) \times [1 - \exp(1 - k_0 T_0 \sec^2 \theta)] d\theta \tag{4}$$

船體로 因한 波高를 整理하면 波濤는 振幅函數로 表示할 수 있고 이로서 造波抵抗이 表示될 수 있다. 成分波의 概念이 $\theta > 70^\circ$ 의 領域에서도 適用되도록 重率 振幅函數(weighed amplitude function)을 使用하게 되면 (5)式으로 造波抵抗을 나타낼 수 있다.

$$R_w = \frac{\pi}{2} \rho U^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} [\{S^*(\theta)\}^2 + \{C^*(\theta)\}^2] d\theta \tag{5}$$

$$\text{단, } S^* + iC^* = -\frac{H_0}{2\pi} \sec^3 \theta \int_{-\tau_0}^0 \int_{-l}^l m \times \exp[k_0(x_0 \sec \theta i + z_0 \sec^2 \theta)] dx_0 dz_0 \tag{6}$$

特異點系

特異點系의 세기를 (6)式과 같이 多項式으로 表示할 수 있다고 하자.

$$m(\xi) = \sum_{i=1}^n A_i \xi^i \tag{6}$$

$$\text{단, } \xi = x/l$$

重率 振幅函數도 (7)式과 같이 정의하던 造波抵抗係數(C_w)는 (8)式으로 表示된다.

$$S^*(\theta) = \sum_{i=0}^n A_i S_i^*(\theta)$$

$$C^*(\theta) = \sum_{i=0}^n A_i C_i^*(\theta) \tag{7}$$

$$C_w = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} [\{S^*(\theta)\}^2 + \{C^*(\theta)\}^2] d\theta$$

$$= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n A_i A_j I_{ij}' \tag{8}$$

$$\text{단, } I_{ij}' = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} [S_i^*(\theta) S_j^{*'}(\theta) + C_i^*(\theta) C_j^{*'}(\theta)] d\theta$$

이때 j 개의 幾何學的 條件이 주어졌을 때 造波抵抗係數를 最適化函數로 (9)式과 같이 쓰기로 하면 (10)式의 解로부터 特異點세기를 나타내는 係數 A_i 를 얻을 수 있게 된다.

$$C_w = f(A_i, \lambda_j) \tag{9}$$

여기서 λ_j 는 幾何學的 條件과 特異點分布를 연결시켜주는 Lagrangian multiplier이다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial A_i} &= 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \lambda_j} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

制限水域에서의 流線追跡

特異點分布가 決定되었을 때 그로부터 얻어지는 船型을 確認하기 위하여서는 流線을 追跡하여야 한다. 보통의 商船의 경우에는 比較的 작은 F_n 에서 運航되므로 成分波의 波高는 또한 작아질 것으로 볼 수 있어 $F_n < 0.35$ 의 領域에서는 二重 模型近似를 使用할 수 있다.

側壁과 바닥이 制限된 水域의 中心線면에 特異點이 分布되어 있다고 하였을 때 鏡像法을 使用하여 境界條件을 充足시키면 速度 potential은 (11)式으로 나타낼 수 있다.

$$\phi = -\frac{1}{4\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{k'=-\infty}^{\infty} \int S_0 \left\{ \frac{1}{\sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta + 2hb)^2 + (\zeta - \zeta_0 + 2kd)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(\xi - \kappa_0)^2 + (\eta + 2hb)^2 + (\zeta + \zeta_0 + 2kd)^2}} \right\} dS \quad (11)$$

단, $dS = d\xi d\zeta$

여기서 b 는 制限水域의 半幅이며 이는 水深을 나타낸다. (11)式으로부터 流線方程式(12)를 滿足하는 解를 얻으면 流線을 얻을 수 있게 된다. Lunge-Kutta 法을 使用하였을 때 流線을 追跡한 結果가 되며 特異點系로 因하여 形成되는 形象을 얻을 수 있게 된다.

$$\frac{dx}{-U+u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{z} \quad (12)$$

理論船形과 造波 抵抗

最適造波抵抗이 되는 特異點 分布를 (10)式의 解로부터 求하고 얻어진 特異點系가 假想的 制限水域內에 놓여졌다고 생각하자. 이때 b 와 d 가 無限히 큰 값을 갖는 경우는 $h=k=0$ 일 때에만 값이 存在하게 되어 無限水域에서의 問題가 되게 된다. b 와 d 가 無限인 경우와 有限인 경우에 對하여 (12)式을 풀어 船型을 이루는 流線을 求하던 두 船型은 序言에서 言及한 바와 같이 다른 形態의 船型이 되게 된다. b 와 d 가 無限大인 경우의 船型은 船型計劃法에서 지금까지 使用하여온 理論最適船型이 된다.

이에 對하여 b 와 d 가 有限일 때의 船型은 理論最適船型은 아니나 b 와 d 를 適切히 選定하였을 때는 理論最適船型을 實用化하기 위하여 順整作業을 거쳐 얻어지는 船型에 代身할 수 있는 船型으로 얻을 수 있다고 假定하자.

이 假定을 確認키 위하여서는 船型을 求하여 肉眼으로 判定하여 實用성이 認定되어야 할 뿐 아니라 無限水域에서의 造波抵抗도 理論最適船型의 造波抵抗과 차이가 없어야 한다는 條件을 滿足하여야 한다.

實用化될 수 있는 船型의 造波抵抗을 理論的 最適船型의 造波抵抗과 比較하기 위하여서는 同一한 方法에 依한 造波抵抗計算이 必要하므로 두 船型을 船體表面에 分布된 特異點系로 다시 定義하기로 하자. 船體의 浸水表面上的 點 q 에 特異點이 놓여져 있고 그로부터 空間上的 任意的 點 p 까지의 距離를 $r(p, q)$ 라 할 때 速度 potential은 (13)式으로 표시된다.

$$\phi(x, y, z) = \iint_S \frac{m(q)}{r(p, q)} dS \quad (13)$$

(13)式의 特異點 세기 $m(q)$ 는 二重模型近似를 使用할 때 (14)式으로 表示되는 船體表面上에서의 條件을 充足하는 積分方程式의 解로부터 얻을 수 있다.

$$U \cdot n_x = \frac{m}{2} - \frac{1}{4\pi} \iint_S m \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+z_0)^2}} \right] dS \quad (14)$$

그러나 解를 求함에 있어서 未知數가 많아 計算에 많은 時間이 必要하게 된다. 計算時間을 短縮하는 方法의 하나로써 Kan은 船舶을 細長하다고 보아 (14)式을 (15)式으로 變換하였다.

$$P(x, \theta) = 2Un(x, \theta) + \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi P(x, \theta') \bar{K}(x, \theta, \theta') d\theta' \quad (15)$$

여기서

$$\begin{aligned} P &= m \cdot F \\ F &= \sqrt{1 + \left(\frac{\partial R}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{R \partial \theta}\right)^2} \\ \bar{K} &= 2R' \left\{ \left[R' \cos(\theta - \theta') - R + R' \sin(\theta - \theta') \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\partial R}{R \partial \theta} \right] / R_M + \left[R' \cos(\theta + \theta') - R + R' \sin(\theta - \theta') \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\partial R}{R \partial \theta} \right] / R_p \right\} \\ R_M &= R^2 + R'^2 - 2RR'(\theta - \theta') \\ R_p &= R^2 + R'^2 - 2RR'(\theta + \theta') \\ U_x &= -U/F \cdot \frac{\partial R}{\partial x} \end{aligned}$$

R 과 θ 는 細長한 船體를 區間的으로 柱狀體로 취급하였을 때 圓桶座標系로 表示되는 中心軸으로부터 表面要素까지의 거리와 角을 나타내게 된다.

(15)式을 使用하는 경우에는 船舶을 區間別로는 柱狀

體로取扱한 결과가되어 計算量이 크게 줄어들게 된다.

造波抵抗은 (15)式으로 부터 얻어진 特異點계기 m 을 사용하여 (16)式으로 計算되게 된다.

$$R_w = \frac{\rho K_0^2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (P^2 + Q^2) \sec^3 \theta \, d\theta \quad (16)$$

$$\text{但, } P + iQ = \int_{S_0} m \cdot \exp [K_0 \{i(x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) \sec^2 \theta + z_0 \sec^2 \theta\}] \, dS$$

數值計算 및 考察

假想的 制限水域內에 特異點系가 놓여져 있는 경우에 特異點系로 因하여 形成되는 幾何學的 形態는 側壁이나 바닥이 流體流動을 制限하게 되므로 流線이 無限水域에서와 다르게 되어 特異點系가 無限水域에 놓여졌을 때 얻어지는 形態와는 다르게 된다. 形態의 變化를 確認하기 위하여 假想水域을 設定한 후 計算을 遂行하여 船型을 求하고 그들의 造波抵抗을 比較하였다.

잘 알려져 있는 Inui船型 S201은 Fig. 1과 같은 形態를 갖으며 이 船型을 이루는 特異點系가 $d/L=0.075$ 이고 $b/L=\infty$ 인 水域에 놓여진 경우에 流線追跡으로 船型을 얻으면 Fig. 2를 얻게 된다. Fig. 1과 Fig. 2를 比較하면 Fig. 2에 圖示된 船型은 Fig. 1의 船型에 比較하여 平底化되었으나 船幅의 增加가 나타나고 있음을 確認할 수 있다. 그러나 造波抵抗을 支配하는 主

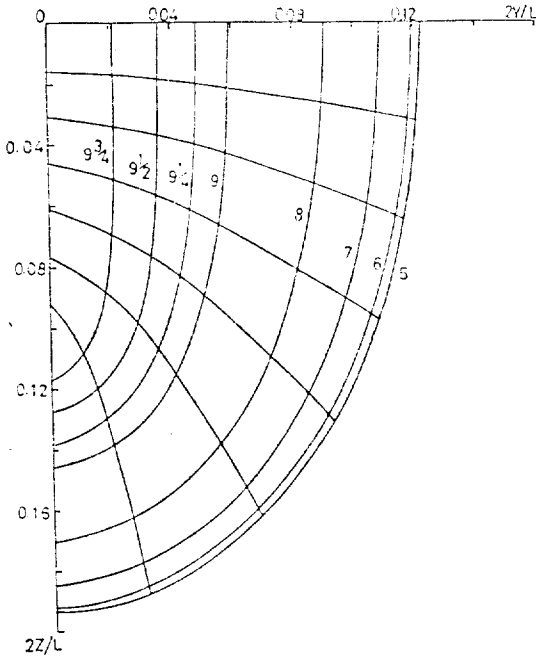


Fig. 1. Body Plan of Inuid Model S-201.

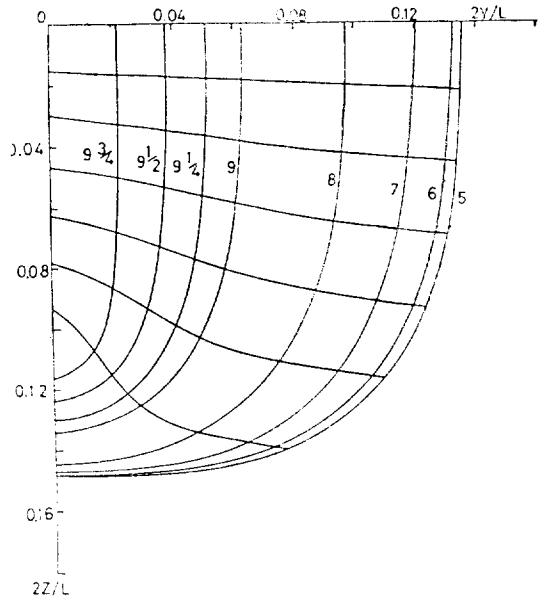


Fig. 2. Body Plan of Inuid Model ($d/L=0.075$).

要因子的 하나인 C_p 의 變化는 그리 크지 않음을 直觀的으로 알 수 있다. 制限水域을 $d/L=0.075$, $b/L=0.15$ 로 假想하여 그 속에 特異點系가 놓여 있다고 假定하였을 때 流線追跡하여 얻어지는 船型은 Fig. 3과 같다. Fig. 1과 Fig. 3을 比較하면 船幅의 變化가 거의 없는 狀態에서 平底化가 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 즉 造波抵抗에 큰 影響을 주는 水線面의 形態에도 큰 變化가 일어나지 않았으며 Fig. 2의 경우와 같이 C_p 에도 큰 變化가 없었음을 보여주고 있다. 따라서 最適理論船型을 求하고 手作業으로 實施하던 順整作業에서의 條件을 모두 充足시키고 있음을 알 수 있다.

이들 두 船型에 對하여 造波抵抗을 計算하면 Fig. 4의 結果를 얻을 수 있게 된다. 이에 의하면 $F_w < 0.3$ 의 區間에서는 약간의 差異가 있으나 全體적으로 두 船型의 造波抵抗은 거의 같은 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

商工部 標準船인 10000GT級 liner船型의 幾何學的 條件을 設計條件으로 擇하여 Pienoid法을 適用함으로써 船型 改良을 成功的으로 이룩한 曁의 研究 結果와 比較하기 위하여 같은 船型을 對象으로 생각하였다. 이 船型에 대하여 船體中心線面을 特異點 分布面으로 하여, 즉 Inuid法을 사용하여 最少造波抵抗이 되는 特異點系를 求하면 그 계기는 (17)式으로 주어지게 된다

$$m(\xi) = 0.23306\xi + 8.86048\xi^2 - 19.2611\xi^3 + 10.94848\xi^4 \quad (17)$$

(17)式으로 주어지는 特異點系는 無限水域에서 流線 追跡하여 그로 因하여 形成되는 船型을 求하면 Fig. 5 와 같다. 이 船型을 Piendoid法을 使用한 曁의 研究에 서의 最適理論船型(MSA-12 Fig. 6)과 比較하던 特異點의 세기는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 거의 비슷한 分布를 하고 있으나 幾何學的인 型態는 전혀 다른 것 을 알 수 있다. 그러나 얻어진 特異點系를 制限水域에 놓여 있다고 假定하여 $d/L=0.065$ 일때에 對하여 流線 追跡을 遂行하던 Fig. 8과 같은 船型을 얻을 수 있다. 이 경우는 Fig. 5의 船型이 C_b 값에 큰 變動없이 平底化 시킨 경우에 해당되어 水線面의 形狀은 달라지고 있다. 그러나 Fig. 6과 Fig. 8을 比較하던 두 船型은 水線面의 最大幅과 形像이 一致하고 있음을 알 수 있다. 船底의 形態는 Fig. 8에서는 平底化되어 있어 Fig.

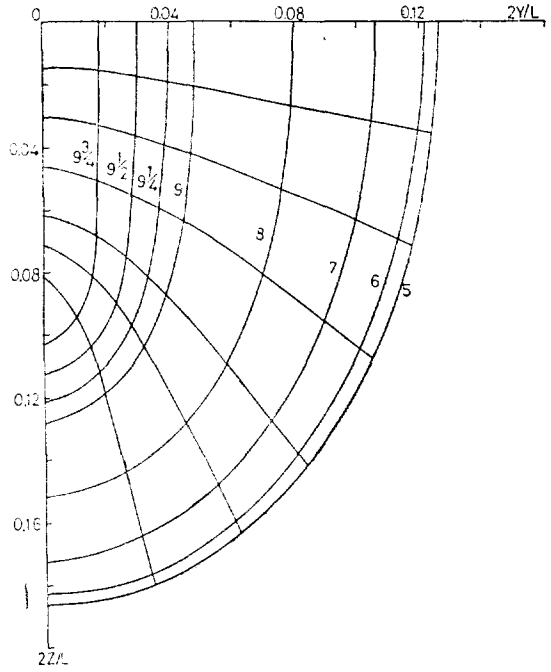


Fig. 5. Body Plan of Modified Inuid Model ($d/L=\infty$).

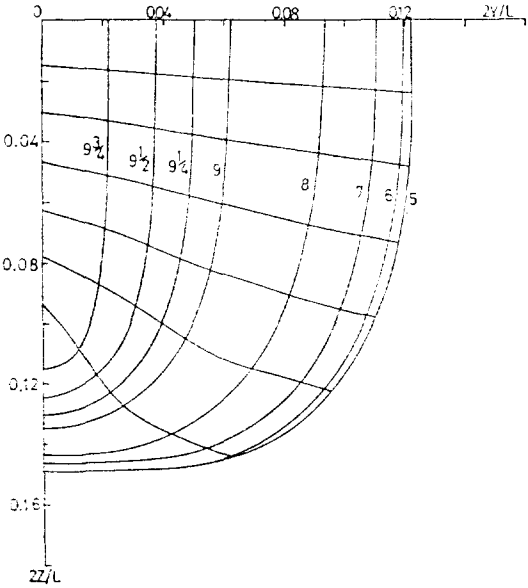


Fig. 3. Body Plan of Inuid Model ($d/L=0.075$, $b/L=0.15$).

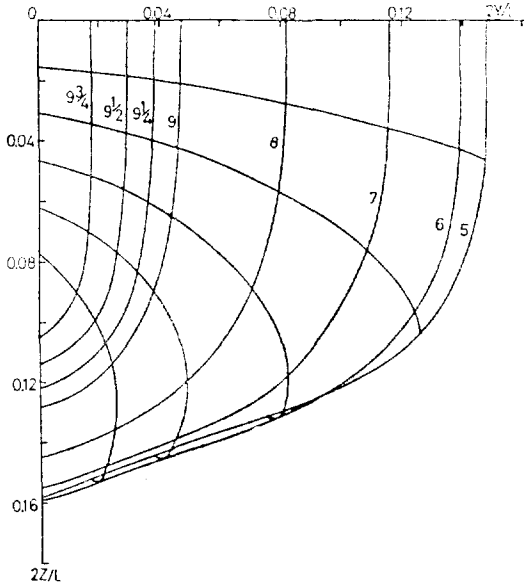


Fig. 6. Body Plan of Piendoid Model MSA-12.

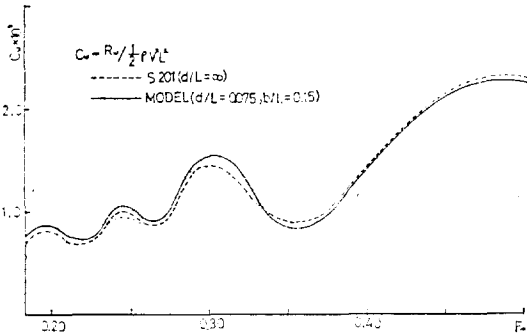


Fig. 4. Wave Resistance Curve for Inuid Model.

結 言

船體中心線面을 特異點 分布面으로 하여 最適의 特異點系를 求하고 그로부터 얻어지는 船型을 假想的 制限水域內에 特異點系가 놓이는 것으로보아 流線追跡하여 平底化시키므로서 人爲的 順整作業에 代身할 수 있는 船型을 얻을 수 있음을 보이었다. 그러나 이 方法에서는 假想的 側壁이나 바닥의 設定에 直觀的 要素가 남아 있으며 그들이 幾何學的 形態에 미치는 影響을 充分히 調査하지 못하였으며 實驗的 檢證이 이루어지지 못하고 있다. 따라서 앞으로 이에 對한 研究를 계속함으로써 實用化하는 것이 바람직하다고 判斷된다.

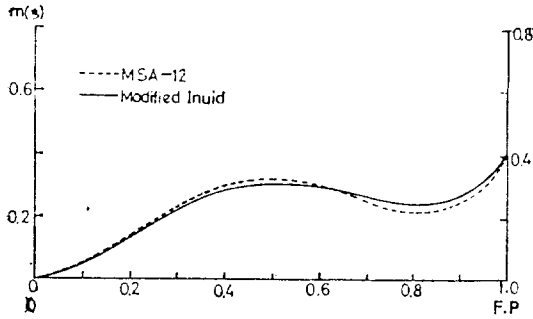


Fig. 7. Strength of Source Distribution.

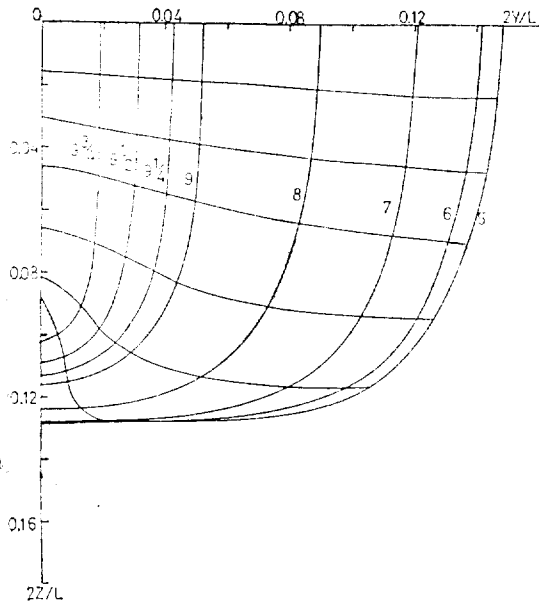


Fig. 8. Body Plan of Modified Inuid Model ($d/L=0.065$).

6을 實用化하기 위하여 遂行하던 것과 같은 人爲的 順整作業을 거치지 않더라도 實用化될 수 있음을 알 수 있다. 이들 理論船型들에 對하여 造波抵抗을 計算하면 Fig. 9와 같은 結果가 얻어진다. 이에 의하면 設計速度範圍內에서의 造波抵抗은 큰 差異가 없음을 알 수 있다. 따라서 船型計劃法에서의 問題點으로 되어 있던 人爲的 順整作業을 피하면서 實用化할 수 있는 平底化된 船型을 얻을 수 있는 길이 摸索되었다 할 수 있다. 특히 이 경우는 가장 간단한 特異點 分布面을 使用하고 있어 制限水域을 假想함으로써 나타나는 計算量에 增加를 相殺하고 있음은 주목할만하다.

References

- [1] Inui, T.: "A New Theory of Wave-Making Resistance Based on the Exact Condition of the Surface of Ships", Journal of S.N.A.J., Vol. 93, 1953.
- [2] Inui, Kajitani, Kasahara; "Non-Bulbous Hull Forms Derived from Surface Distribution on the Vertical Rectangular Plane", International Seminar on Theoretical Wave Resistance, Ann Arbor, 1963.
- [3] Pien, Pao C.: "The Application of Wave-Making Resistance Theory to the Design of Ship Hulls with Low Total Resistance", 5th Symposium on Naval Hydrodynamics, O.N.R., 1964.
- [4] Kyu Jong Cho and S. Hong; "A Study on Source Generated Ships of Minimum wave Resistance", Journal of S.N.A.K., Vol. 7, No. 2, 1970.
- [5] Havelock, T.H.: "Wave Patterns and Wave Resistance", T.I.N.A., Vol. 76, 1934.
- [6] Inui, T.: "Study on Wave-Making Resistance of Ships", S.N.A.J. 60th Anniversary Series, Vol. 2, 1957.
- [7] Inui, Kajitani, Fukutani, Yamaguchi; "On Wave-Making Mechanism of Ship Hull Forms Generated from Undulatory Source Distributions", Selected Paper from Journal of S.N.A.J., Vol. 4, 1970.
- [8] Inui, T., Kajitani, H.: "Hull Form Design,

- It's Practice and Theoretical Background", International Seminar on Theoretical Wave Resistance, Tokyo, Japan, 1976.
- [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] Kostyukov, A.A.: "Theory of Waves and Wave Resistance", Effective Communications Inc., Iowa City, 1968.
- [11] Kan, M.: "Calculation of Non-Lifting Potential Flow about Ship Hulls", Selected Paper from Journal of S.N.A.J., Vol. 9, 1972.
- [12] Hyochul Kim and J.C. Seo "A Study on the Characteristics of Wave Resistance and Hull Form obtained at Finite Water Depth", Journal of S.N.A.K., Vol. 17, No. 1, 1980.
- [13] 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.
- [14] 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.