

Water Jet 推進裝置의 開發 Development of Water Jet Propulsion Systems

Kawakami Takashi, Yamada Isao, Kamide Naohiro and Oimatu Ryoichi
(Mitsubishi Heavy Industry Ltd.)

1. 서 언

船舶의 Water Jet (以下 W/J) 推進은 그 原理가 상당히 오래전부터 잘 알려져 있었음에도 불구하고, 比較的 小型의 船舶이나 特殊分野에의 適用에 한정되어 있었다. 그러나, 近年 高速旅客艇이나 TSL (Techno Superliner) 등으로 代表되는 海上輸送의 高速化 要求에 따라, 大型 高速船에의 適用이 增加하는 傾向이다.

當社에 있어서도, 1986년에 當社の 送迎船用으로서, 235 kW級 2基를 開發, 實用化한 以來, 1991년에는 漁船·Diving boat 등을 對象으로한 小型汎用시리즈, 1992년에는 超高速 全沒水中翼船用 4000 kW級, 1993년에는 12500 kW級을 완성하였다. 이 사이에 W/J 推進裝置에 要求되는 各種 技術개발을 實施하여 왔기 때문에, 여기에서는 超高速 全沒水中翼船 SS400 "Rainbow"用 W/J 推進裝置의 開發을 例로 그 일부를 紹介한다.

2. 最適 W/J 推進裝置의 仕様 檢討

W/J 推進裝置를 船舶에 搭載하는 경우, 最適인 裝置 仕様을 구할 必要가 있다. 以下에 Rainbow用 W/J 推進裝置 仕様의 檢討例를 보인다.

그림 1은 計劃点에서의 最適 W/J 推進裝置의 仕様 및 概略的인 主要치수計算 Flow이다. 그림 2는 구하여진 仕様의 推進裝置가 各 船速에서 어떠한 推力特性을 나타내는가를 檢討하는 計算 Flow이다.

이들 計算 Flow에 의해 各種 파라메타 조사를 수행하고, W/J 推進裝置의 最適仕樣을 구하는 경우, 다음 사항에 留意해야할 것으로 생각된다. W/J 推進裝置의 펌프性能외에, 吸入管路性能 및 推力減少率 t , 伴流率 ω 등의 船体와 W/J의 간섭에 의한 影響을 正確히 豫測할 必要가 있다. 또, 구하여지는 W/J 推進裝置의 치수·重量으로부터 船体性能에의 feedback도 重要하다고 생각된다.

그림 2에 보이는 推力特性曲線을 精度 좋게 구하는데에는 펌프의 Q-H 特性, Cavitation 特性 및 吸入管路의 性能豫測精度가 중요하고, 模型試驗 등으로 正確한 特性을 把握하여 놓는 것이 좋다. 특히 Cavitation特性에 대해서는 性能低下特性외에 損傷特性에 대해서도 充分한 檢討가 必要하다.

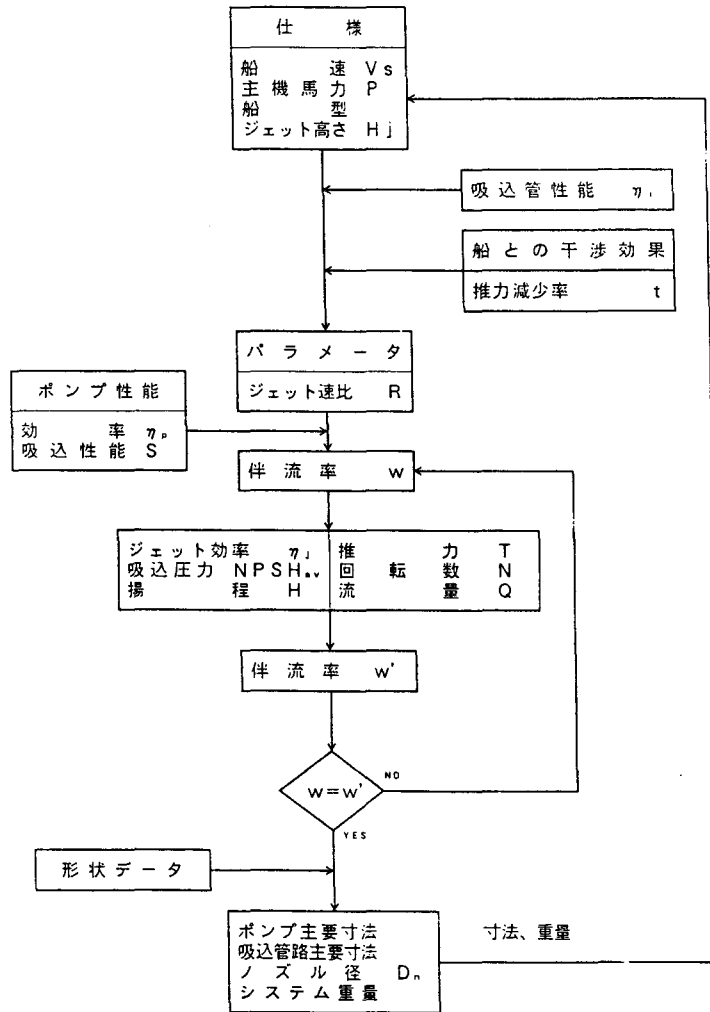


그림 1 計劃点仕様 및 概要主要寸寸計算 Flow

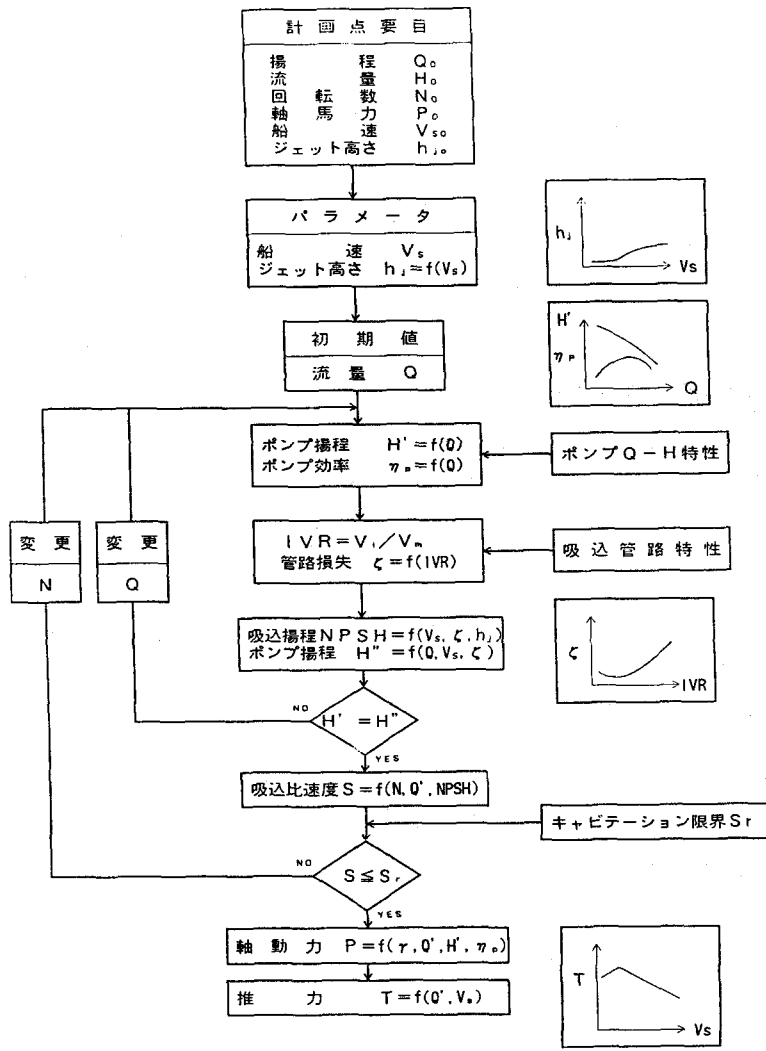


그림 2 推力特性曲線の 計算 Flow

3. 펌프의 水力形状

開發에 있어서, 超高速 水中翼船用으로서 小型, 輕量化, 加速性能向上 및 巡航時의 高性能化等의 要求事項을 考慮하여, 基本方針을 아래와 같이 設定하였다.

- (1) 小型·輕量일 것 : 高負荷化
- (2) 높은 推力性能을 가질 것 : 高效率化

- (3) 低船速領域에서의 推力特性(加速性)이 우수할 것 : 高吸入性能化
- (4) 長壽命 : 低 Cavitation 損傷

實機의 設計·製作에 있어서도 3次元 FEM 解析技術을 驅使한 構造設計를 수행함과 동시에 임펠러는 鍛造스테인리스鋼 素材를 5軸 NC 切削加功으로 製作하는 등, 徹底한 輕量化를 수행하였다.

3-1 水力設計

2項에 보이는 最適化의 結果, 一般的으로 斜流 임펠러의 領域으로 되는 比速度 ns 가 約 550($m, m^3/min$)이 選定되었으나, 徹底한 小型·輕量化를 도모하기 위해, 임펠러入口徑과 出口徑이 同一하게되는 軸流形式을 採用하였다. 이와같은 高負荷設計된 임펠러는 현저하게 部分負荷特性이 惡化되기 때문에 一般産業用 펌프로써 採用되는 일은 거의 없지만, W/J 推進裝置의 펌프 作動範圍는 기껏해야 定格點에서 90% 流量程度까지로 部分負荷流量領域에서의 特性을 거의 고려할 必要가 없기 때문에, 定格點 近傍에서 가장 바람직한 性能을 發揮하는 設計法의 採用이 可能하게 된다.

따라서 水力設計에 있어서는 다음에 나타내는 特徵을 가지도록 하였다.

- (1) 輕量化를 目的으로 펌프 임펠러 出口角을 크게 채택하고, 外徑을 目玉徑과 同一하게 하였다. (從來形의 75%로 小徑化)
- (2) 離水 및 加速時에 剩餘推力의 여유를 가지기위해 吸入比速度 S 는 2500($m, m^3/min$) 以上으로 하였다.

그림 3에 實機임펠러의 寫眞을 보인다. 高負荷設計를 實現하기위하여 前翼 6枚, 後翼 12枚의 二重翼列形式을 採用하고 前翼·後翼 相對位置는 周方向으로 어긋나도록 설치하여 損失의 增加가 最少로 되도록 配慮하였다.

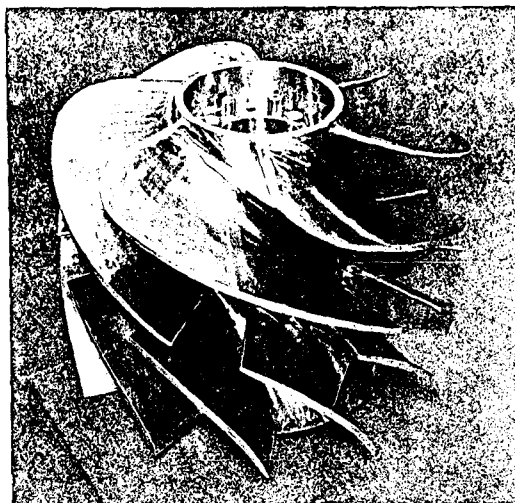


그림 3 회 전 차

3-2 水力模型試驗

設計된 W/J 推進裝置에 대해서는 實機設計에 앞서서 W/J 推進裝置의 펌프로서의 성능을 명확히 하기위해 實機의 約 1/3 縮尺의 相似模型을 製作하고 水力性能試驗을 實施하였다. 試驗은 模型을 閉 loop 試驗裝置에 설치하고 流量·揚程特性, 效率·Cavitation 特性을 計測함과 동시에, 펌프 內部흐름, 水壓脈動 및 회전차応力等に 대해서도 詳細計測을 하였다. 또, 模型은 회전차 外筒部를 透明한 아크릴樹脂에 의해 製作하고, 각종 吸入條件에 있어서 Cavitation의 發生狀況을 觀察하였다. 그림 4는 通常航行時 相當 및 加速時 相當의 회전차에 있어서 Cavitation 發生狀況 사진을 보인다.



(加速時)



(通常航行時)

그림 4 Cavitation 發生狀況

한편, Cavitation 損傷量 豫測評價에 대해서는 材料의 耐 Cavitation 강도를 磁歪試驗으로 評價한 외에 類似한 模型회전차의 翼面에 超小型의 衝擊壓센서를 裝着하고 Cavitation 係數, 流量, 回轉數를 파라메터로 Cavitation 崩壞壓力을 直接 計測하고 Cavitation 강도를 評價하였다. 또, 이어서 小型模型 회전차를 實機 適用材料와 동일한 것으로 製作하고 實機 作動 條

件과 Cavitation 係數, 流量係數를 맞추어 實周速에 있어서 損傷量 評價試驗을 수행하여 損傷量이 實機壽命上 問題로 되지 않는 範圍에 있는 것을 確認하였다.

4. 吸入管路

吸入管路는 船底로부터 海水를 吸入하여 W/J 推進裝置까지 海水를 유도하는 重要な 部分으로, W/J 推進裝置의 入口 吸入흐름에 影響을 미칠뿐만 아니라 船体形狀이나 船体配置에도 影響을 미치기 때문에 設計에 있어서는 시스템 全體로서의 最適化에 留意하였다.

吸入管路의 特性은 그림 5에 나타내듯이 型式에 의해 크게 다르지만, 空氣吸入등의 特性도 加味하여 SS400에서는 Pot형 inlet을 採用하였다. 具體的인 設計檢討는 下記의 項目에 대하여 수행하였다.

- (1) 損失이 적은 管路形狀(엘보角度, 面積變化率 等)
- (2) 管路内外의 Cavitation 抑制
- (3) 包含水重量의 低減

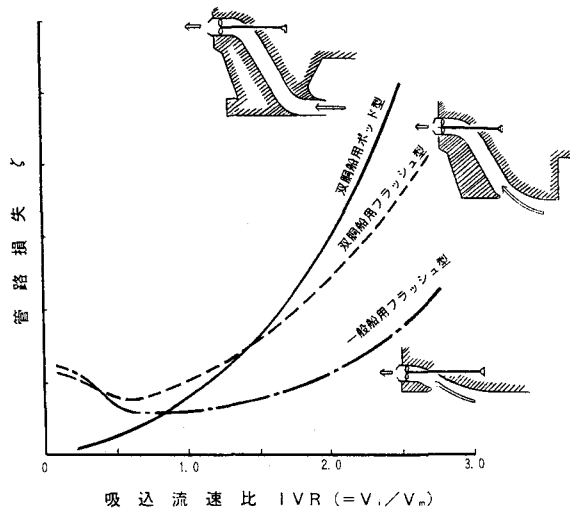
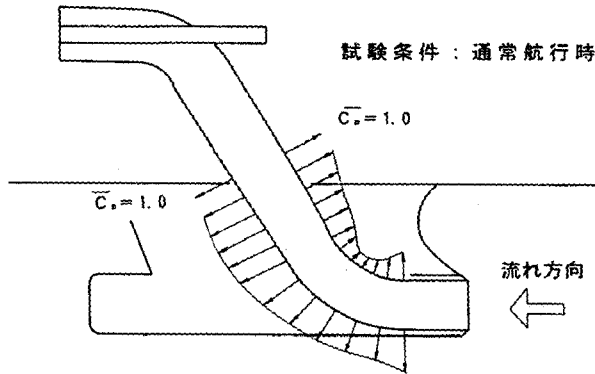


그림 5 吸入管路型式과 負荷特性

船殼의 構造를 포함한 3次元 CAD 모델을 作成하여, 流路의 面積變化·包含水重量의 檢討를 수행한 후 流動解析을 실시하여 流路形狀을 設計하였다. 또, 詳細한 特性을 把握·確認하기 위하여 模型에 의한 風洞試驗, Cavitation 터널 試驗을 實施하였다. 風洞試驗에서는 주로 管路損失, 壓力分布, 流速分布를 檢討하고, Cavitation 터널 試驗에서는 管路內 및 管路外壁部의 Cavitation 特性의 檢討를 하였다.

그림 6에 風洞試驗結果의 一例로서 管路壁의 壓力分布를 보인다.



計測値は計測点出口圧力係數으로、無次元化하였다.

그림 6 風洞試驗結果

5. 推力性能

W/J 推進裝置의 推進效率 η_{OA} 는 一般의으로 다음 식으로 표현된다.

$$\eta_{OA} = \eta_p \cdot \eta_j \cdot \eta_H \cdot \eta_t$$

여기서, η_p = 펌프效率, η_j = Jet效率, η_H = 船体效率, η_t = 傳達效率이다.

推進效率을 豫測하기 위해서는 펌프의 單獨效率 η_p , 驅動機의 傳達效率 η_t , 噴射速度比, 吸入管路損失, Jet 높이 등으로부터 결정되는 Jet效率 η_j 를 正確히 豫測하는 외에, 船体와 推進裝置의 干涉으로부터 결정되는 船体效率 η_H 를 豫測할 必要가 있다. 双胴水中翼船을 對象으로 船体와 W/J 推進裝置의 干涉效果를 模型試驗에서 구한 例를 以下에 보인다.

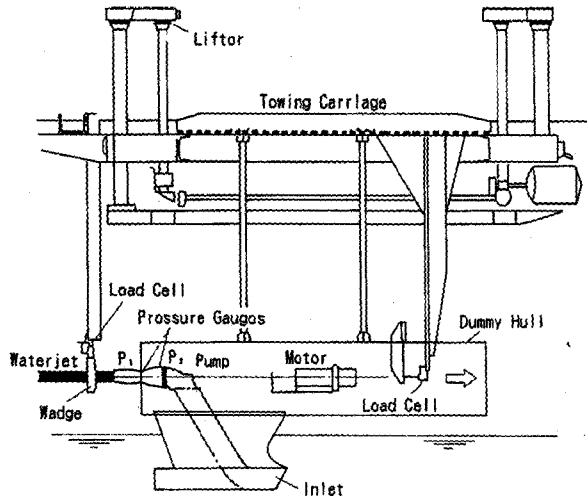


그림 7 예항수조 模型試驗의 構成

그림 7에 보이듯이 模型船체에 吸入Pot strut와 W/J 推進裝置를 附着하여, 曳航水槽를 이용하여 試驗을 실시하였다. W/J의 推力은 出口노즐部の 다른 2점의 壓力差로부터의 計算과, 노즐後方에 設置된 wedge에 作用한 壓力으로부터 求하였다. Inlet system 抵抗 D_i 는 入口를 폐쇄한 狀態에서 抵抗 R 을 이용하여 다음식으로 求하였다.

$$D_i = T_{gross} - R$$

여기서 T_{gross} 는 W/J의 推力이다.

入口流速比(IVR)에 대해서 各種의 速度에 있어서 inlet system 抵抗係數를 그림 8에 보인다. System 抵抗係數 C_{Di} 는 다음식으로 定義한다.

$$C_{Di} = D_i / (1/2 \rho V_m^2 A_i)$$

여기서 ρ : 密度, V_m : inlet 流速, A_i : inlet 面積이다.

IVR이 增加하면 inlet system 抵抗係數가 음의 값으로 되는 것을 알수 있다.

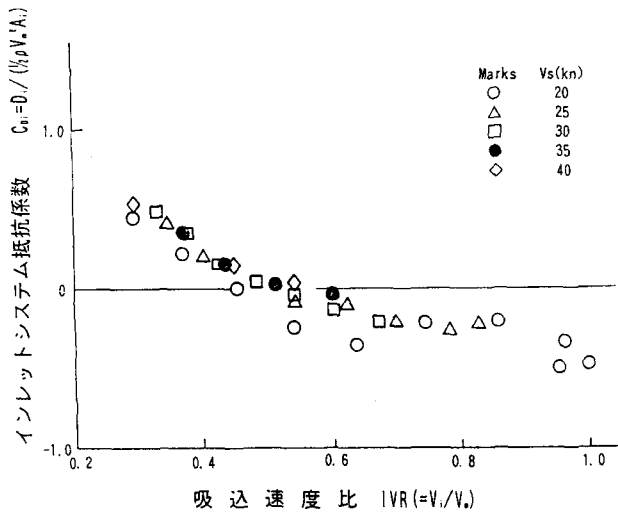


그림 8 Inlet System의 抵抗係數와 吸入速度比

6. 實機試驗

6-1 工場試驗

W/J 推進裝置는 一般의으로 裝置單品을 工場出荷時에 試驗을 실시하는 일은 없으나, 本品은 各種 先進技術을 適用한 大出力機로서는 처음의 裝置였기 때문에, 그림 9에 보이는 試驗

장치를 만들어 出荷前에, 그 性能·機能을 檢證하는 외에, 海上試驗時의 性能檢證用 index를 구하였다. 具體的인 試驗計測項目은 回轉數·流量을 파라메터로 하여, 揚程, 效率, 회전차應力, 各部의 振動과 회전차前後의 代表点間에 있어서 壓力差 等이다. 그림 10은 計測된 회전차前後의 代表点間의 差壓과 流量·揚程의 關係이다.

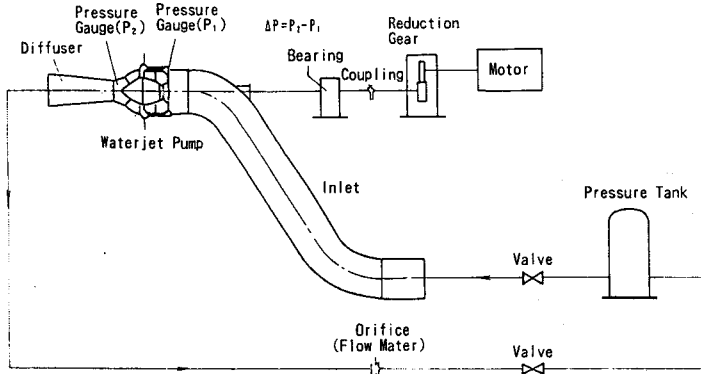


그림 9 工場試驗 Loop 構成

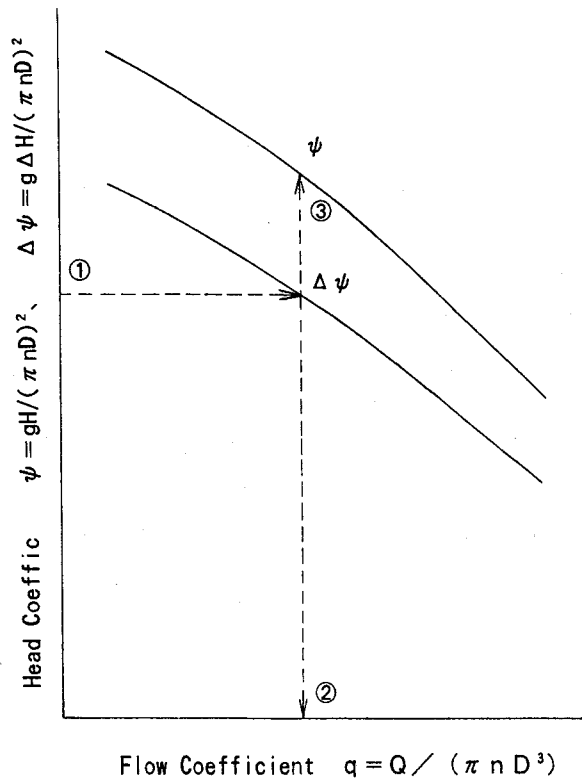


그림 10 회전車前後差壓과 流量·揚程

6-2 海上試驗

海上試驗에 있어서는, 各部의 振動, 溫度, 機能의 計測評價 이외에, 走行中の 회전차前後의 差壓을 計測하고 工場試驗結果의 index를 이용하여 推力을 구하였다. 이 實測推力은 計劃時 各種 檢討한 값과 잘 一致하고, 推力豫測이 타당한 것을 나타내었다. 同時에 主機出力을 torque meter를 이용하여 計測하고, 上記 推力으로부터 逆算한 出力과 比較評價도 實施하였다. 그림 11에 그 結果例를 보인다.

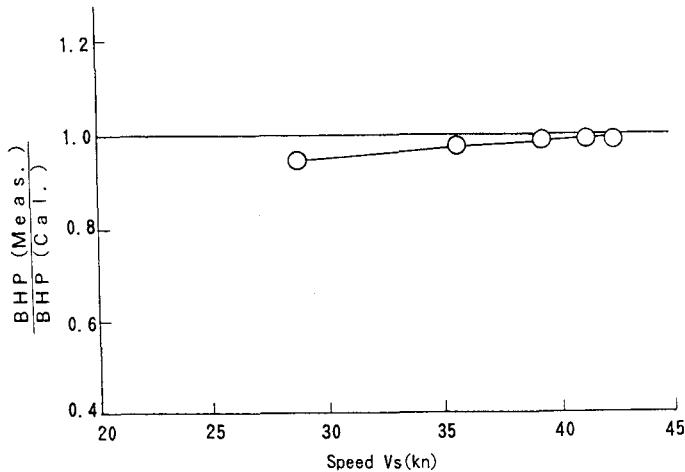


그림 11 海上試驗에서 主機出力實測과 計算値의 比較

7. 결 언

以上, 日本 最大 4000 kW級의 超高速 全攪水中翼船用 W/J 推進裝置를 例로, MHI의 W/J 推進裝置의 技術開發狀況의 일부를 紹介하였다. 本 W/J 推進裝置를 搭載한 SS400 "Rainbow"는 1993年 4月 1日부터 혹독한 海上氣候로 알려진 島根縣 隱岐島 航路에 就航하였다. W/J 推進裝置에 대한 運航狀態·點檢時의 狀況을 定期的으로 취합하고 있으나 現在 까지 順調로히 運轉되고 있다. 今後は 더욱 耐久性等に 焦點을 맞추어 취합하여 갈 豫定이다. 또, 今年 9月부터 Techno Superliner 實驗船 「飛翔」用으로서, 더욱 高出力의 12500 kW級 W/J 推進裝置가 海上試驗中이다. 이 W/J 推進裝置에는 大型회전차의 輕量化를 目的으로 溶接組立 회전차를 採用하였다. 이들 W/J의 運航狀況을 충분히 把握하고 한층 性能·信賴性 向上에 노력함과 함께 海上交通의 高速化에 貢獻하고자한다.

參考文獻

- 1) 山田, 吉田, 木原, 家田, 後河內, Water Jet 推進器用 Pump, Turbo機械協會 第 20回 講演會(1987 - 5)
- 2) 山田, 中村, 他, 三菱 505 Water Jet 推進 System의 開發, Turbo機械協會 第 30回 講演會(1992 - 7)

- 3) 川上, 上出, 山田, 中村, 老松, 5000馬力級 Water Jet 推進装置の開發
Turbo機械協會 第 20卷 第 9号 (1993 - 9)
- 4) Kihara, K., Hamada, C., Miyoshi, M., Sueoka, H., Kawakami. T., Harada. T.,
Toki. N., Diesel Driven Fully Submerged Hydrofoil Catamaran : Mitsubishi
Super-Shuttle400, the "RAINBOW", Proceedings of FAST'93, Yokohama, Japan
- 5) Hoshino, T., Baba, E., Determination of Propulsive Performance of Waterjet in
Model and Full Scales, 20th ITTC Workshop on Waterjets.
- 6) 遠藤, Techno Superliner 實驗船 「疾風」, 「飛翔」の概要, 船の科學, Vol. 47
(1994 - 7)