

高速船의 船型試驗에 關하여

梁 承 一*

1. 序 論

歴史的으로 實船의 性能을 推定하기 위해 模型船을 利用한 것은 Leonard da Vinci(1452~1519)로 부터 비롯된다. 그러나 19세기까지도 주로 다른 유사한 船型과의 性能비교로 그치는 정도였을 뿐이었다. 그 후 鋼船과 蒸氣機關의 출현으로 새로운 船型의 開發이 요청되어졌으나 별로 큰 進展이 이루어지질 못했다. 그러나 19세기말 英國의 造船工學者인 William Froude에 의해서 큰 轉機가 이루어졌다. Froude는 처음으로 模型船과 實船과의 相互關係에 관한 기본적 洞察力을 模型船試驗으로부터 擲得했으며 이는 곧 현재의 船型試驗法의 根幹을 이루고 있다. Froude는 1870년 해군의 지원으로 船型試驗水槽(85mL×11mB×3mD)를 만들었고, 이로부터 Froude의 比較法則(Law of Comparison)을 가정한 模型試驗法에 의한 實船의 性能推定에 自信이 더해져왔음은 주지의 사실이다.

本 內容에서는 Froude의 Model Scaling 및 船型試驗이 소개될 것이며, 간단한 예로 最適船型設計를 目的으로 수행된 船型試驗을 단계적으로 살펴보기로 한다.

2. MODEL SCALING

模型試驗에는 模型船의 Scaling이 가장 중요하며 여기에는 幾何學的, 運動學的, 動力學的 相似法則(Geometric, Kinematic & Dynamic Similitudes)이 고려되어야 한다. 船體抵抗문제에 있어 次元해석을 적용하면 다음의 관계를 얻는다.

$$\frac{D}{1/2 \rho L^2 V^2} = f\left(\frac{VL}{\nu}, \frac{V}{\sqrt{gL}}\right) \quad (1)$$

혹은

$$C_D = f(R_n, F_n) \quad (1)'$$

여기에서, D : drag, V : speed, L : length, ρ : water density, ν : Kinematic viscosity, g : gravity, C_D : drag

coefficient, R_n : Reynolds number, F_n : Froude number

(1)식에서 동일한 R_n 와 F_n 를 만족시킬 수 있다면, 模型船과 實船은 같은 C_D 의 값을 가짐을 알 수 있다. 그러나 이러한 관계는 다음에서 理解되듯이 실제로는 성립하지 못한다. 즉 $g, \nu,$ 및 ρ 가 일정한 값이라면 $F_{nModel} = F_{nShip}$ 로부터 $V_M > V_S$, 또한 $R_{nShip} = R_{nModel}$ 로부터 $V_M > V_S$, 다시 말하면 일정한 값으로는 불가능하다. 만약 해수와 다른 유체를 이용한다면,

* Froude scaling의 경우(g 가 일정), $\frac{V_M}{V_S} = \sqrt{\frac{L_M}{L_S}}$ 이

따라서 $R_{nModel} = R_{nShip}$ 를 만족시키려면 $\frac{\nu_M}{\nu_S} = \left(\frac{L_M}{L_S}\right)^{3/2}$

예로서 $\lambda = L_S/L_M = 10$ 이라면 $\frac{\nu_M}{\nu_S} = 0.032$ 그러나 $\nu_{Water} = 10^{-5} \text{ft}^2/\text{sec}$, $\nu_{Air} = 1.6 \times 10^{-4} \text{ft}^2/\text{sec}$ 로 미루어 보아 물보다 작은 ν 를 갖는 유체는 거의 없으므로 Froude scaling은 어렵다.

* Reynolds scaling의 경우(ν 가 일정), $\frac{V_M}{V_S} = \frac{L_S}{L_M}$ 이

따라서 $F_{nModel} = F_{nShip}$ 를 만족시키려면 $\frac{g_M}{g_S} = \left(\frac{L_S}{L_M}\right)^3$

$\lambda = 10$ 인 경우 $\frac{g_M}{g_S} = 1,000$ 즉 불가능하다.

이상의 두 경우로부터 模型試驗을 동일한 F_n 와 R_n 에서 수행한다는 것은 불가능하므로 두 개의 scaling중 하나를 택하여야 한다. Reynolds scaling보다는 Froude scaling이 더 실제적으로 적용될 수 있다. 전자는 $V_M > V_S$ 즉 模型船이 實船보다 빨라야 한다는 어려움이 있기 때문이며, 후자의 경우에는 Reynolds scaling을 다음과 같이 가능한 한 보상시킬 수 있다. 즉 “크기가 다른 동형의 모형선을 실선의 F_n 상태에서 실험한다.”는 것이다.

Fig. 1과 같이 $C_D = C_D(F_{nShip}, R_{nModel})$ 曲線(AB)으로부터 實船의 R_n 에 해당되는 값(點 C)를 외삽법으로 얻는다. 그러나 이러한 과정에는 매우 긴 橫軸이 필요한 어려움이 있으므로 좀 더 단순화하여야 한다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이, 우선 $F_n = 0$ 에 해당되는

* 正會員 : 韓國船舶研究所

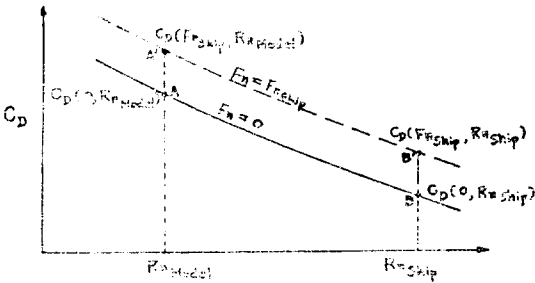


Fig. 1.

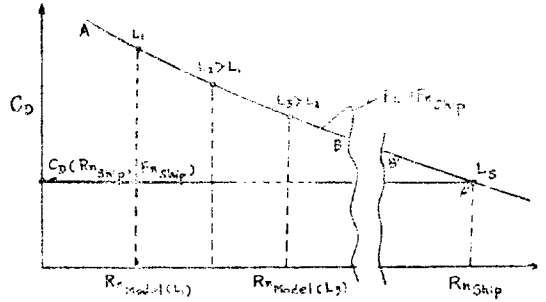


Fig. 2.

$C_D(0, R_n)$ 곡선(AB)을 구한다. (이는 wind tunnel에서 "Double Model"을 이용하여 얻는다.) 그리고 模型船을 F_{nShip} 에서의 $C_D(F_{nShip}, R_{nModel})$ 값(點 A')을 얻는다.

여기에서 F_n 가 일정한 C_D 곡선(AB와 A'B')이 같은 모양을 갖는다고 가정한다면, AA'와 BB'는 동일한 값을 준다. 즉,

$$C_D(F_{nShip}, R_{nModel}) - C_D(0, R_{nModel}) = C_D(F_{nShip}, R_{nShip}) - C_D(0, R_{nShip})$$

그러므로 實船의 C_D 의 값(點 B')은,

$$C_D = C_D(F_{nShip}, R_{nShip}) = C_D(0, R_{nShip}) + \{C_D(F_{nShip}, R_{nModel}) - C_D(0, R_{nModel})\} \quad (2)$$

이 단계에서 조선공학자는 하나 더 단순화를 시킨다. 즉 $C_D = C_D(F_n = 0, R_n)$ 의 값을 동일한 速度에서의 船型的 浸水面積과 길이가 같은 평판의 마찰저항으로 가정하고 있다. 이 값은 Froude, Prandtl-Schlichting, Hughes, Schoenherr(ATTC), ITTC의 公式들로 구해져왔다. 그러므로 Froude의 Model scaling에 의한 模型試驗으로부터 C_D 가 구해지며, 實船과 模型船의 縮尺係數는 Table 1과 같다.

Table 1. Relation between Ship and Model in terms of linear scale factor(λ)

Length	λ	Momentum, impulse	$\lambda^{3/2}$
Time	$\lambda^{1/2}$	Work, energy	λ^4
Force(resistance, weight)	λ^3	Torque, moment of force	λ^4
Mass	λ^3	Power	$\lambda^{3/2}$
Area	λ^2	Pressure, stress	λ
Volume and first moment of area	λ^3	Elastic modulus	λ
Density	1	Viscosity	$\lambda^{1/2}$
Specific weight	1	Angle	1
Moment of inertia	λ^5	Frequency	$\lambda^{-1/2}$
Speed, velocity	$\lambda^{1/2}$	Surface tension	λ^2
Acceleration	1	Vorticity	$\lambda^{-1/2}$
Angular velocity, revolutions	$\lambda^{-1/2}$	Mass mont	λ^4
Angular accelerations	λ^{-1}		

3. 船型試驗

船舶研究機關과 造船所와의 상호관계는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 대단히 密接하다고 할 수 있다. 造船所는 船型的 基本設計를 위해서 開發船型的 抵抗推進

및 運動性能을 船型試驗에 의해 提供받을 수 있다. 반면에 研究機關은 試運轉資料를 船型試驗 결과와 비교함으로써 Fig. 4와 같은 상관계수(Correlation Allowance)를 얻을 수 있으며 이는 정확한 추정을 가능하게 할 것이다.

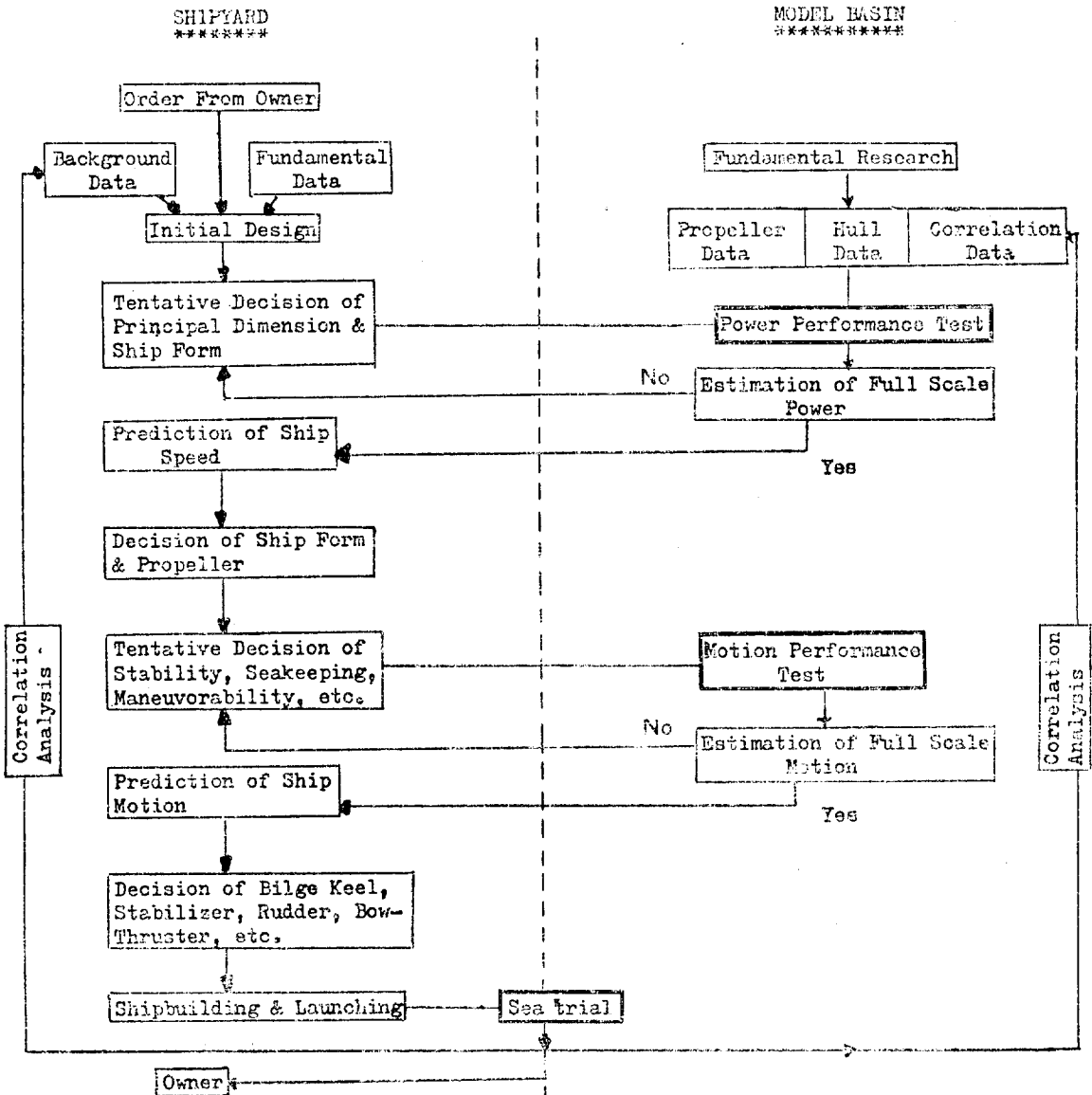


Fig. 3. Correlation between Shipyard and Model Basin

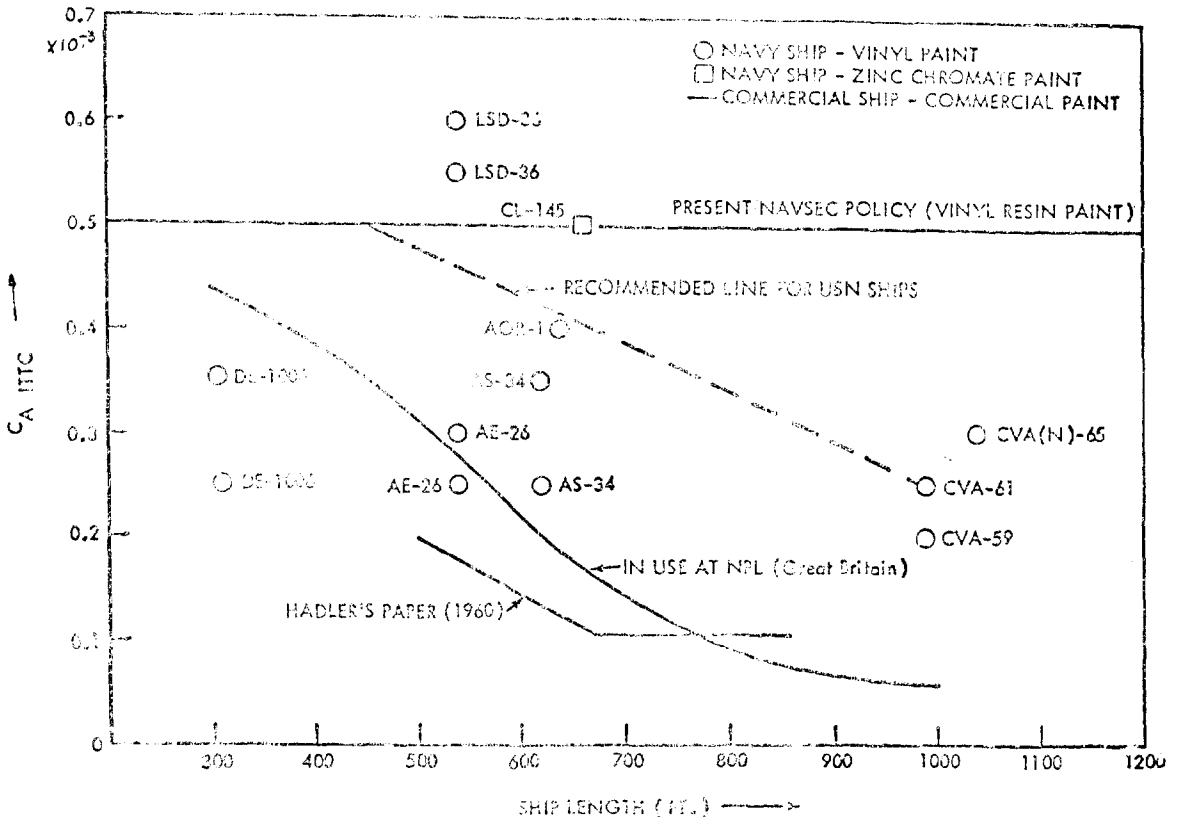


Fig. 4. Correlation Allowance

이러한 장기적인 統計資料의 예로서 Fig.5와 Fig.6. 은 10개 船種에 대한 抵抗增加係數와 伴流比의 最小·最大·平均値를 보여주고 있다.

初期設計과정에서 所要馬力을 추정할 경우, 餘裕度 혹은 不正確度(Level of Uncertainty)와 船型試驗의 關係는 다음과 같다.

- * 概念設計(Conceptual Design) : 11% 以內(模型試驗遂行以前)
- * 豫備設計(Preliminary Design) : 9% 以內(模型試驗遂行以前)
- * 豫備 혹은 契約設計(Preliminary or Contract Design) : 6% 以內(stock propeller를 利用한 模型試驗 遂行)
- * 契約設計(Contract Design) : 3% 以內(design propeller를 利用한 模型試驗 遂行)

Appendix에는 抵抗, 自抗推進, propeller單獨, 流線調查, 伴流調查, 空洞現象調查, 騒音調查, 耐航性試驗, 航海操縱性試驗, 煙氣흐름調查 등 10개 船型試驗에 대한 시험조건, 결과 등이 정리되어 있다.

4. 最適船型設計을 위한 模型試驗의 예

화란해군에서는 "S-Frigate"의 개발을 위해 1973년 NSMB(Netherlands Ship Model Basin)에 일련의 저항추진에 관한 모형시험을 의뢰하였다. "Standard" Frigate는 1976년 12월에 1호가 進水된 이래 계속 건조되고 있으며 길이가 121.8m, 배수량이 3,850ton, 최고속도가 32knots이다. 주요목적은 선체와 Appendage의 저항특성과 sonar dome, bilge keel, stabilizer, strut의 최적위치, 프로펠라의 회전방향에 관한 자료를 얻고, LCB와 Cp의 변화에 따른 最適船型을 찾는 데에 있다. 왓쓰모형선에는 난류축진용으로 Stud가 취부되었으며, 시험결과는 "ITTC 1957 Model-Ship Correlation Line"과 CA=0.0004를 고려하여 標準상태(海水온도 15°C)에서의 實船의 性能으로 추정되었다. NSMB에서 수행된 시험을 단계적으로 소개해 본다.

* 제 1 단계 : 선체만의 抵抗試驗과 sonar dome의 최적 위치 選定을 위한 抵抗試驗. sonar dome의 위치에 따른 저항의 증감량은 -1%부터 4%까지로서 工作

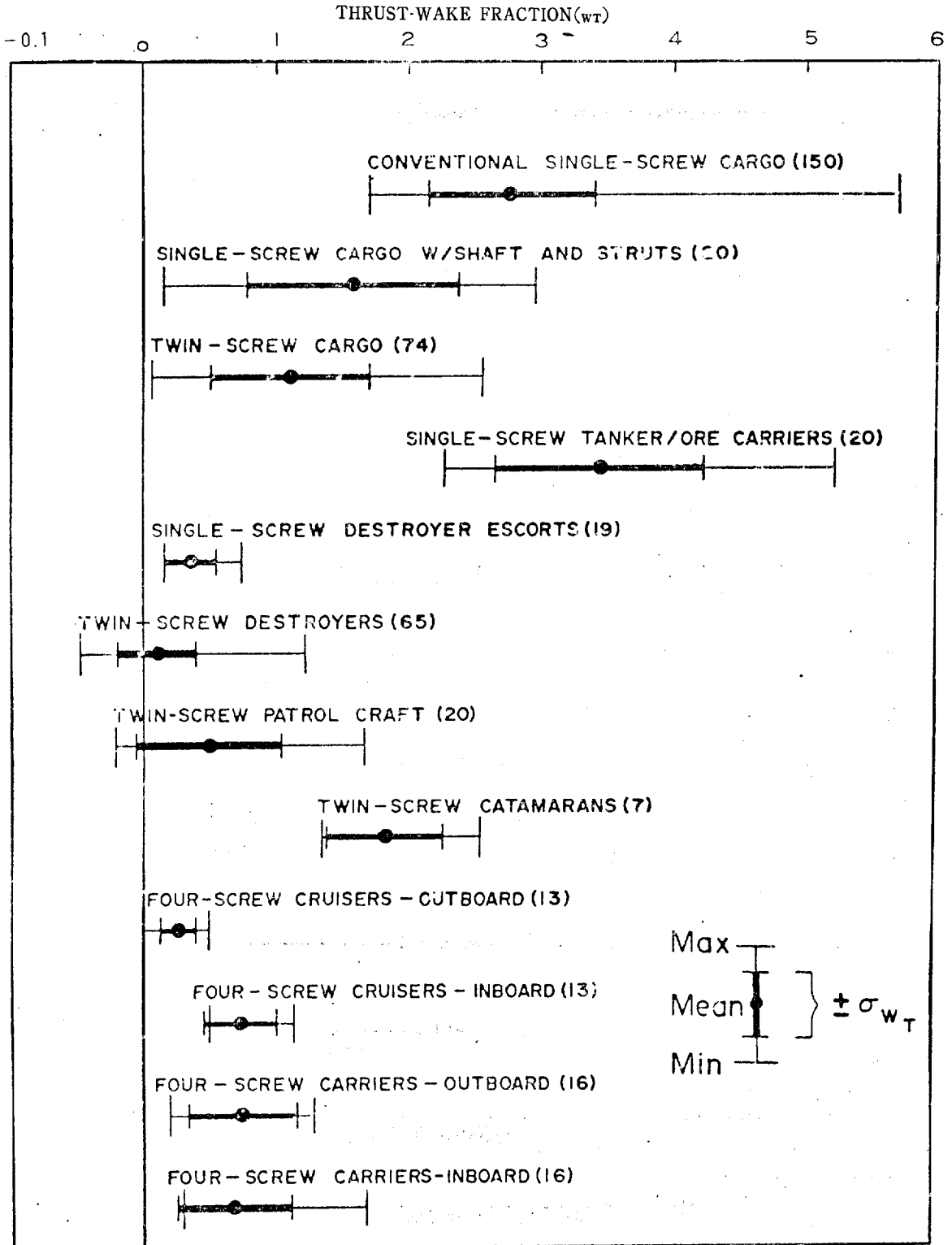


Fig. 5. Thrust-Wake Fraction(w_T) for 10 Types of Ships Tested at DTNSRDC

THRUST-DEDUCTION FRACTION(t)

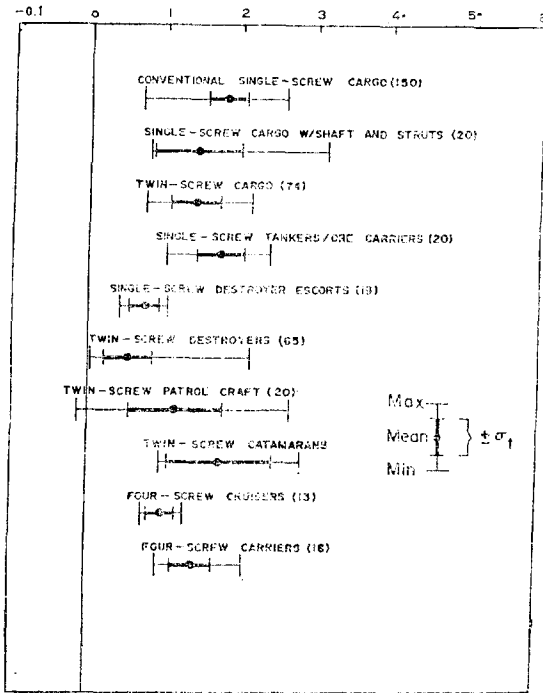


Fig. 6. Thrust-Deduction Fraction(t) for 10 Types of Ships Tested at DTNSRDC

상의 문제점을 감안하여 sonar dome의 위치를 決定함.

- * 제 2 단계 : Appendage (sonar dome, bilge keels, stabilizers, struts and bossings)에 의한 저항증가량과 선미부분의 속도분포조사에 관한 試驗. 결과로서,
 - dome, keel, stabilizer에 의해 3~7% 저항증가,
 - strut가 추가되면 18~24% 저항증가,
 - bossing이 추가되면 24~30% 저항증가,
 - 유선의 파악으로 bilge keel의 위치 결정,
 - stabilizer의 각도결정(4° down of trailing edge),
 - strut의 각도결정,
 - 속도분포에 따른 프로펠라설계자료.

- * 제 3 단계 : 최종결정된 Appendage에 의한 저항시험과 좌우편 프로펠라의 회전방향결정을 위한 저항추진시험. 결과에 의하면, Appendages에 의해 최고속도에서 22%가량 저항이 증가되며 회전방향에 따른 축마력은 다음과 같다.

-Outward turning이 inward보다 4.6%가량 많이 요구되며 따라서 속도도 0.2knot가량 떨어진다.

- * 제 4 단계 : Parent 模型船의 C_M 은 고정시키고 단지

station별 면적을 적당히 증감시킨 船型들의 저항특성을 비교하였다. 즉 C_P 를 달리하는 2개, LCB의 위치가 바뀐 2개 등 4개의 모형선이 추가 제작되었다. Table 2의 抵抗特性 비교로부터 최소저항을 갖는 船型 "E"를 찾을 수 있었다.

이상의 저항추진시험외에도 船型의 特性에 따른 시험이 추가로 수행되어야 할 것이다.

Table 2. Variation of Parent Model

MODEL	C_P	LCB aft % of LBP	RESISTANCE	
			16 Knots	32 Knots
A (Parent)	0.59	2.9	100	100
B	0.59	0.4	100.8	101.3
C	0.59	5.4	98.8	102.8
D	0.63	2.9	100.6	107.7
E	0.55	2.9	98.3	94.5

5. 結 論

船型試驗에 의한 推定의 精度는 아직도 계속 研究·開發되어야 할 餘地가 있다. 그러나 보다 우수한 船舶의 設計에는 船型試驗이 不可避한 것이 船舶設計의 현실이라 할 수 있다.

따라서, 船主가 요구하는 여러가지 特性을 만족시켜주는 船型의 開發에는 비록 시간과 돈이 要하더라도 船型試驗水槽에서의 體系의인 模型試驗이 遂行되어야 하겠다.

參 考 文 獻

- [1] A.J.W., Lap, "Fundamentals of Ship Resistance," N.S.M.B. Publication No. 127a, 1956.
- [2] J. D. Van Manen, "Fundamentals of Ship Propulsion," N.S.M.B. Publication No. 132a, 1956.
- [3] F.H. Todd, "Resistance and Propulsion," S.N.A. M.E. Chap. VII P.N.A.
- [4] D. Phillips-Birt, "Ship Model Testing," John de Graff Inc., N.Y. 1970.
- [5] P. Covich, "Guide for the Preparation of Hydrodynamic and Aerodynamics Model Test Program in Support of USN Surface Displacement Ship Design," NAVSEC Technical Report No. 6136-74-17, May 1975.
- [6] "S-Frigate, Ship Model No. 4449" NSMB Model Test Report, Files 1~4, June 1974.

APPENDIX

1. Resistance Test

a. Model

- fitted without any appendages except skeg for bare hull test.
- for appended hull test fitted with all appendages, i.e., shaft struts, bossings, bilge keels, stabilizers, sonar dome, rudder, etc.
- at the designed load (or draft) condition and light load condition for commercial ships. In addition, at the 10% heavier condition of designed maximum displacement for military vessels.
- speed range from at least 5% below the lowest speed at which reliable data is required to at least 5% above the highest speed required in increments of 2-5 knots depending upon the type of vessels.

b. Presentation

- adopted frictional line with correlation allowance (C_A).
- EHP (and R/Δ), trim, etc. vs. V_k (and F_n) at standard condition.

2. Flow Visualization Test

a. Model

- fitted with all appendages except bilge keels, stabilizers and struts.
- at the designed maximum load condition.
- at the maximum speed and cruising speed.

b. Presentation

- stream lines along the hull to determine the optimum placement of bilge keels, stabilizers and struts.
- photos showing flow direction by tufts or vanes.

3. Self-Propulsion Test

a. Model

- fitted with appendages using stock and/or designed propeller(s).
- at the maximum load condition and, if necessary, at the light load condition for military vessels.
- speed range from the lowest to the highest speeds at which propulsion data are required in increments of 2-5 knots.

b. Presentation

- model connection and tested propulsion point (e.g., ship or model propulsion point).
- SHP. EHP/SHP, rpm, J, t, w, η_H, η_R , PC. vs. V_k at standard condition.

4. Wake Survey Test

a. Model

- fitted with appendages except propeller.
- at the maximum load condition.
- at the maximum and cruising speeds.
- for the points selected from the several radial circles (e.g. 0.3R, 0.5R, 0.7R, 0.9R, 1.0R and 1.1R) with every 10 degrees for each circles.

b. Presentation

- used instrument (e.g., pitot-tube, vane wheel, hot wire, etc.) and measured positions.
- velocity components (axial, tangential and radial).
- harmonic analysis of full scale components and integrated values of exciting forces and moments.
- diagrams of iso-wake contour (axial component) and circumferential component (sum of radial and tangential components).

5. Open-Water Propeller Test

a. Model

- with a designed propeller under the propeller immersion of $R_n \geq 5 \times 10^5$.
- from zero thrust ($J \approx 0.1$) to zero speed of advance.

b. Presentation

- propeller immersion (R_n)
- $K_T, 10K_Q, \eta_0$, rpm (and K_T/J^2 , etc.) vs. J .

6. Cavitation Test (in Cavitation Tunnel or Variable Pressure Circulating Water Channel)

a. Model

- with a designed angle of shaft inclination.
- with simulated wake distribution, if possible, by wire meshes, dummy stern of model hull depending upon the size of the measuring section.
- at a series of values of σ , the slip ratio being varied at each one by propeller revolution or water

speed.

b. Presentation

- wake simulation method
- K_T , $10K_Q$, η_0 , σ , rpm and thrust breakdown vs. J .
- Observation of cavitation and erosion phenomena with photos and sketches.

7. Noise Test (in the Depressurized Towing Tank or Cavitation Tunnel)

a. Model

- fitted with appendages.
- speed range from cruising to maximum speed in increments of 4 knots.
- at maximum load condition.

b. Presentation

- noise spectra on model or full scale in 1/3 octave bands or narrow bands in the 2-75KHz frequency range.

8. Smoke Test

a. Model

- with the above-water portion of a model.
- tested in water or air depending upon the circulating water channel or wind tunnel, respectively.
- at the maximum and cruising speeds.
- at the maximum and the light load displacements.

b. Presentation

- observation of paints or smoke from the funnels in the fluid.

9. Seakeeping Test

a. Model

- fitted with appendages and a deck.
- propelled by a sub-carriage or remote-controlled motor depending upon model basins.
- at the maximum and cruising speeds.
- at the maximum load condition.
- wave directions of head, bow quartering, beam, stern quartering and following seas.
- two irregular sea states, fully developed sea condition corresponding to Beaufort 4-8. (in case of regular waves, at least five different wave lengths

with $\lambda/L = \frac{1}{2} - 2\frac{1}{2}$).

- test period of at least 30min. in full scale.

b. Presentation

- longitudinal and transverse radius of gyration and natural period of pitch, roll and heave measured at zero speed.
- wave spectrum used for the test and wave height with significant values.
- transfer functions (response amplitude operators) pitch, roll and heave.
- relative motion and vertical acceleration at chosen stations.
- significant amplitudes of pitch, roll, heave, vertical acceleration and relative motion.
- impact pressure under the bow at chosen locations.
- number of occurrence of deck wetness, propeller emergency and slamming for given period of time.
- test period in full and model scales.
- motion pictures of interesting conditions.
- results of the measurements must be statistically analysed to yield the mean value, root-mean-square value, significant value, maximum value.

10. Maneuvering Test

a. Model

- fitted with appendages and a deck.
- tested by using a PMM system, remote-controlled motor or sub-carriage depending upon model basins.
- at the maximum and cruising speeds.
- at the maximum load condition.

b. Presentation

- spiral maneuver: to plot the results as an ordinate constant rate of turn against a base of rudder angle (loop height and width).
- zig-zag maneuver: to plot the results as rudder angle and heading angle against a base of time (overshoot angle, overshoot time and period).
- turning circle test: to plot ship's track (head reach and side reach) relative to land or to water (advance, transfer, drift angle, tactical diameter and turning diameter).