
 論 文

大韓造船學會誌
 第25卷 第4號 1988年 12月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 25, No. 4, December 1988

통계해석에 의한 저항 추정 및 선형 개량

홍성완*, 조규종*, 윤도수**, 김은찬***, 정우철****

Estimation of Ship Resistance by Statistical Analysis and its Application to Hull Form Modification

by

S.W. Hong*, K.J. Cho*, D.S. Yun**, E.C. Kim*** and W.C. Jung****

요 약

본 논문은 선박저항 추정을 위한 통계해석 방법을 기술하고 있다. 조파저항계수 추정식은 조파저항이론을 이용하여 선체주요치수와 횡단면적계수들로부터 유도하였으며, 그 회귀계수들은 저항시험결과를 회귀분석하여 얻었다. 형상영향계수 추정식은 선체주요치수, 횡단면적계수와 저항시험결과들로부터 순수하게 회귀분석하여 얻었다. 또한 선체주요치수는 바꾸지 않고 횡단면적곡선만을 변화시켜 조파저항을 최소로 해주는 방법을 제시하였다. 이 방법들은 산적화물선의 저항성능 추정에 적용하였다. 그리고 조파저항이 최소가 되는 수정선형을 도출해 냈으며, 이로 인한 유효동력의 절감효과를 저항시험을 통해 확인하였다.

Abstract

This paper describes the statistical analysis method of predicting the ship resistance. The equation for the wavemaking resistance coefficient is derived as the principal dimensions and sectional area coefficients by using the wavemaking resistance theory and its regression coefficients are determined from the regression analysis of the resistance test results. The equation for the form factor is derived by purely regression analysis of the principal dimensions, sectional area coefficients and resistance test results. Also, it is shown that the wavemaking resistance can be minimize by varying the sectional area curve without changing the principal dimensions of the ship. This methods were applied to the resistance prediction of a bulk carrier. And then, the modified hull form with minimum wavemaking resistance was obtained and the reduction of effective power was confirmed by the resistance test.

접수일자 : 1988년 6월 11일, 재접수일자 : 1988년 9월 24일

* 정회원, 인하대학교

** 학생회원, 인하대학교 대학원

*** 정회원, 한국기계연구소 대덕실험분소

**** 정회원, 삼성중공업 선박해양연구소

Nomenclature

- A_m : Midship section area
- $A(x)$: Sectional area of x station
- a_i : Lagrangian polynomial coefficient
- B : Breadth of ship
- C_b : Block coefficient
- C_F : Frictional resistance coefficient
- C_K : Form resistance coefficient
- C_m : Midship section coefficient
- C_p : Prismatic coefficient
- C_R : Residual resistance coefficient
- C_W : Wavemaking resistance coefficient
- C_T : Total resistance coefficient
- d : Draft
- E_i : Regression coefficient
- f_i : $A(i)/A_m$ of i station
- F_n : Froude number
- g : Acceleration of gravity
- h : Principal dimension term
- H_{ij} : Regression coefficient
- K_0 : Wave number
- K : Form factor
- L : Length of ship
- L_e : Entrance length
- L_r : Run length
- m : Number of data ships
- n : Number of stations of ship
- $P(\theta), Q(\theta)$: Wave amplitude function
- R_w : Wavemaking resistance
- r : Correlation coefficient
- S : Wetted surface area
- V : Ship speed
- ρ : Mass density of fluid
- η : Half breadth of ship
- ∇ : Displacement volume of ship
- σ : Standard deviation

1. 서 론

저항성능을 정확하게 추정하는 것은 훌륭한 선박을 짓기 위한 기본 요건중의 하나이다. 저항성능을 추정

하는 데에는 모형시험에 의한 방법, 이론계산에 의한 방법, 통계해석에 의한 방법등이 있는데, 초기설계 단계에서는 이론계산에 의한 방법과 통계해석에 의한 방법을 많이 활용하게 된다. 근래에 이르러 화물선에 있어서 운항경제성을 고려하여 저속비대선을 많이 짓게 되었으며, 따라서 저항성능을 이론계산에 의해 추정하기는 더 어려워졌다.

여기서는 저속비대선의 저항성능을 통계해석에 의해 추정하는 방법을 기술하였다. 선박의 저항성분을 분류하는 데에는 여러가지 방법이 있는데 여기서는 평판마찰저항, 점성에 의한 형상저항 및 조파저항으로 나누어 생각하였다. 평판마찰저항은 ITTC 또는 Schoenherr 등의 곡선으로부터 구하게 되므로 조파저항과 형상저항만이 저항성능 추정의 목표가 된다. 비교적 이론계산이 용이하며 정성적인 표현이 가능한 조파저항의 추정은 Michell의 세장선 이론으로부터 선체주요치수와 횡단면적계수들로 표시되는 방정식을 유도한후, 모형시험 결과를 회귀분석하여 얻었다. 형상저항은 점성에 의한 성분으로서, 이론계산으로는 정성적 표현조차 어려우므로 자료선형들의 선체주요치수, 횡단면적 곡선 및 모형시험결과를 순수하게 회귀분석하여 얻었다. 또한 기본선형으로부터 선체주요치수는 변화시키지 않고 횡단면적곡선만을 변화시켜 조파저항이 최소가 되는 선형을 도출해 내는 방법을 정립하였다.

통계해석을 위해 사용된 자료는 105척으로서 모두 일반상선 선형이며, 충분히 큰 모형선에 의해 수조시험이 실시된 자료들이다. 근래에 이르러 모형시험 결과가 체계적으로 발표된 것이 거의 없으므로 자료수집이 매우 어려운 상황이다. 따라서 여기서는 최근의 선형과는 다소 격차가 있지만, 1970년 전후에 일본 '선박'지에 게재된 자료를 적용하였다. 자료의 범위는 방형비계수 $C_b=0.70\sim 0.85$ 이며, 조파저항계수를 회귀분석한 속도는 Froude수 0.12, 0.14, 0.16, 0.18 그리고 0.20이다.

2. 조파저항의 추정

2.1. 조파저항 추정식

정수중에서 일정한 속도 V 로 움직이고 있는 선체를 소오스와 쌍크의 연속된 분포로 나타낼 수 있다고 하면 이론적인 조파저항 R_w 는 Michell의 세장선 이론에 의해 다음식과 같이 쓸 수 있다[1].

$$R_w = 8\pi\rho K_0^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{P(\theta)^2 + Q(\theta)^2\} \sec^3\theta \, d\theta \quad (2.1)$$

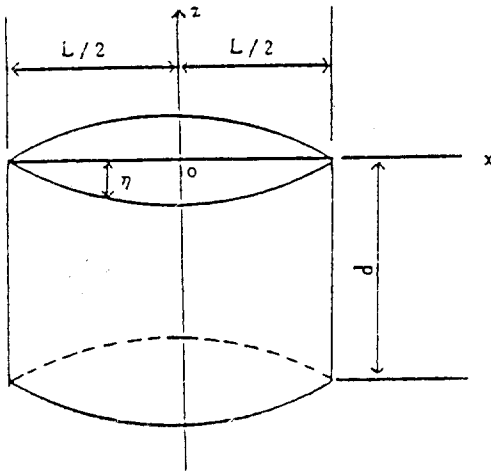


Fig. 1 Frame line shape

$$\left. \begin{matrix} P(\theta) \\ Q(\theta) \end{matrix} \right\} = \frac{V}{2\pi} \iint_{sc} \frac{\partial \eta}{\partial x} \cdot \cos(K_0 x \sec \theta) \cdot e^{K_0 z \sec \theta} dx dz \quad (2.2)$$

여기에서 진폭함수 $P(\theta)$, $Q(\theta)$ 를 선체폭이 전후단에서 0으로 된다는 조건에 의해 부분적분한 형태로 나타내면 다음식과 같다[1].

$$\left. \begin{matrix} P(\theta) \\ Q(\theta) \end{matrix} \right\} = \frac{V}{2\pi} K_0 \sec \theta \int_{-d}^0 dx \int_{-L/2}^{L/2} \eta(x, z) \cdot \exp(K_0 z \sec^2 \theta) \frac{\sin(K_0 x \sec \theta)}{\cos(K_0 x \sec \theta)} dx \quad (2.3)$$

한편 흡수는 일정하고 프레임라인 형상은 Fig. 1과 같이 선축이 수직하게 되어있다고 가정하자.

횡단면적 곡선의 값을 $f_i (i=1, 2, \dots, n)$ 라 하고 횡단면적 곡선은 f_i 의 선형결합으로 표현할 수 있다고 하면 선체반폭 $\eta(x, z)$ 는 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta(x, z) = \eta(x) \quad (2.4)$$

$$= \frac{BC_m}{2} \frac{A(x)}{A_m} = \frac{BC_m}{2} \left(\sum_{i=1}^n a_i(x) f_i \right)$$

여기에서 $A(x)$: x스테이션에서의 횡단면적
 A_m : 중앙상단면적
 C_m : A_m/B_d

식 (2.4)를 식 (2.3)에 대입하고 x에 관해 적분하면 다음식과 같이 된다.

$$\left. \begin{matrix} P(\theta) \\ Q(\theta) \end{matrix} \right\} = \frac{V}{4\pi} BC_m \cos \theta \{ 1 - \exp(-K_0 d \sec^2 \theta) \}$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} \left(\sum_{i=1}^n a_i(x) f_i \right) \cdot \frac{\sin(K_0 x \sec \theta)}{\cos(K_0 x \sec \theta)} dx \quad (2.5)$$

(2.5)식을 (2.1)식에 대입하고 무차원화하면 조파저

항계수 C_W 는 다음 (2.6)식과 같이 된다[2, 3, 4].

$$C_W = \frac{R_W}{1/2 \rho S V^2}$$

$$= h \sum_{i=0}^n \sum_{j=i}^n H_{ij} f_i f_j \quad (2.6)$$

여기에서

$$h = \frac{K_0^2}{\pi} \frac{C_m^2 B^2}{S} (1 - e^{-K_0 d})^2 \quad (2.7)$$

$$H_{ij} = (2 - \delta_{ij}) \int_{-x/2}^{x/2} \left\{ \frac{1 - \exp(-K_0 d \sec^2 \theta)}{1 - \exp(-K_0 d)} \right\}^2 \cdot (I_{si} I_{sj} + I_{ci} I_{cj}) \sec \theta d\theta \quad (2.8)$$

이때

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}$$

$$\left. \begin{matrix} I_{si} \\ I_{ci} \end{matrix} \right\} = \int_{-L/2}^{L/2} a_i(x) \cdot \frac{\sin(K_0 x \sec \theta)}{\cos(K_0 x \sec \theta)} dx$$

(2.8)식의 H_{ij} 값을 실험자료로부터 통계적으로 구해내기 위해 (2.6)식을 풀어서 다시 쓰면 (2.9)식과 같다.

$$C_W = h \{ H_{11} f_1 f_1 + H_{12} f_1 f_2 + H_{13} f_1 f_3 + \dots + H_{1n} f_1 f_n$$

$$+ H_{22} f_2 f_2 + H_{23} f_2 f_3 + \dots + H_{2n} f_2 f_n$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\dots \dots \dots + H_{nn} f_n f_n \} \quad (2.9)$$

여기에서 $H_{11} - H_{nn}$ 이 구하고자 하는 회귀계수가 된다.

2.2. 스테이션 선정

조파저항계수의 추정을 보다 정확하게 하기 위해서는 스테이션 선정을 적절하게 해주어야 하는데 다음과 같은 절차로 선정했다[2, 5, 6].

(1) 조파저항과 상관성이 강한 스테이션의 선정

조파저항과 f_i 간의 상관계수 $r_{C_w f_i}$ 는 (2.10)와 같다.

$$r_{C_w f_i} = \frac{DFC}{\sqrt{DFF \cdot DCC}} \quad (2.10)$$

여기에서 $DFC = \sum_{k=1}^m (f_{ik} - \bar{f}_i) (C_{Wk} - \bar{C}_W)$

$$DFF = \sum_{k=1}^m (f_{ik} - \bar{f}_i)^2$$

$$DCC = \sum_{k=1}^m (C_{Wk} - \bar{C}_W)^2$$

이때 $m=105, i=1 \sim 21$

위 (2.10)식으로 계산된 상관계수를 Fig. 2에 정리하였다. 이는 스테이션별 상관계수의 변화를 그린것으로 Froude수 0.15, 0.17, 0.19에서의 결과만을 실었다. 각 Froude수의 변화에 따라 스테이션 선정도 달라져야

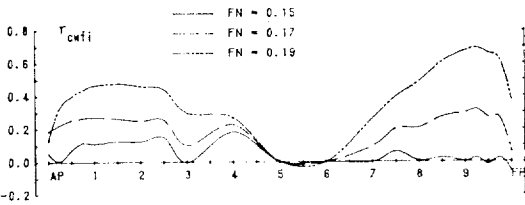


Fig. 2 Correlation coefficients between C_w and f_i

하지만 Fig. 2에서 보느냐와 같이 Froude수의 변화에 따른 상관계수의 경향이 유사하므로 동일한 스테이션을 택하기로 하였다.

그림에서 보면 선미쪽의 스테이션 가운데 상관이 공통적으로 강한곳은 1, 1.5, 2.5 스테이션이며 특히 2.5 스테이션은 세 곡선 모두 곡선변화가 두드러짐을 볼 수 있어 선정에 좋은 조건임을 알 수 있다. 선수쪽은 스테이션 7부터 9에 이르기까지 r 값이 점차로 증가하고 있으며, FP에 이르기까지도 제법 큰값을 보이고 있다. 한편 스테이션 3부터 6까지는 r 값이 비교적 작다고 판단되어 제외하였다. 이에따라 조파저항과 상관인 강한 스테이션을 선정하면 다음과 같다.

1, 1.5, 2.5, 7, 8, 9, 9.25, 9.75, FP

(2) f_i 상호간의 독립성이 강한 스테이션의 선정
 f_i 상호간의 상관계수 $r_{f_i f_j}$ 는 다음과 같다.

$$r_{f_i f_j} = \frac{DF_i F_j}{\sqrt{DF_i F_i \cdot DF_j F_j}} \quad (2.11)$$

여기서 $DF_i F_j = \sum_{k=1}^m (f_{ik} - \bar{f}_i)(f_{jk} - \bar{f}_j)$

이때 $m=105, i=|-2|$

위 (2.11)식에 대한 결과를 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3에서, 각 스테이션의 정점에서 시작하여 좌우로 그어진 직선이 다른 스테이션들과 교차하고 있는데, 교차한 부분의 값이 바로 그 스테이션과의 상관계수가 된다. 따라서 정점에서 그어진 직선의 각이 크면 클수록 인접 스테이션은 물론 나머지 스테이션들과의 r 값이 크기 때문에 f_i 상호간의 독립성은 작은 것이며, 각이

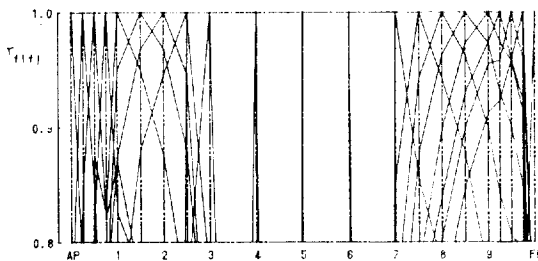


Fig. 3 Correlation coefficients between f_i

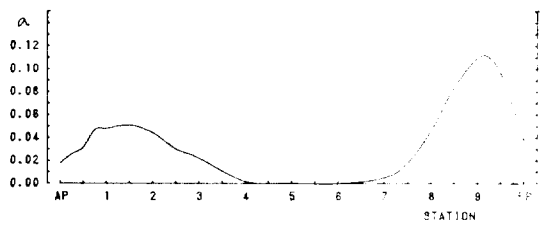


Fig. 4 Standard deviation of f_i

작을수록 독립성이 큰것임을 알 수 있다. 그러므로 정결적이 작게 그어진 스테이션들을 선정하여 상관계수가 대략 0.8미만이 되는 스테이션들을 선정하였다. 이에 따라 선정된 스테이션은 다음과 같다.

AP, 0.25, 0.75, 1, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 9.25, 9.75, FP

(3) 횡단면곡선의 형상을 잘 나타내는 스테이션의 선정

선박들을 대상으로 각 스테이션에서의 f_i 에 대한 표준편차를 (2.12)식에 의해 구하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타냈다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^m (f_{ik} - \bar{f}_i)^2} \quad (2.12)$$

이때 $m=105, i=|-2|$

이에 따라 표준편차값이 일정치 (선미부 : 0.03, 선수부 : 0.05) 이하가 되는 스테이션을 선정하였고, 이는 다음과 같다.

AP, 0.25, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, FP

이상에서 언급한 세가지 조건을 고려하여 선정된 스테이션중 두가지 조건 이상을 만족하는 스테이션을 그 선정 기준으로 했으며, 다만 선수 특히 FP와 9.75스 테이션은 각 선박에 따라 횡단면적곡선의 변화가 크고 별개의 영향등 조파저항에 미치는 영향이 클 것으로 생각하고 포함시켰다. 선정된 스테이션을 보면 선미쪽 보다는 선수쪽이 많이 선정되었음을 알 수 있으며 조파저항이 선체 전반부와 관계가 크다는 사실과 일치하고 있다. 선정된 8개의 스테이션은 다음과 같다.

1, 2.5, 4, 7, 8, 9, 9.75, FP

2.3. 회귀분석

2.1절에서 유도한 회귀방정식 (2.9)식에 2.2절에서 선정된 스테이션을 적용함에 있어 다음과 같이 세가지로 수행, 비교하여 보았다.

(1) 스테이션 3개 결합의 경우

7개의 스테이션 (1, 2.5, 7, 8, 9, 9.75, FP)을 채택하였고, 따라서 변수는 28개가 된다.

(2) 스테이션 8개 결합의 경우

8개의 스테이션 (1, 2.5, 4, 7, 8, 9, 9.75, FP)을 채택하였고, 따라서 변수는 36개가 된다.

(3) 스테이션 7개 결합에 스테이션 단순변수를 추가한 경우

회귀분석의 어려움은 무엇보다도 자료의 빈곤에 기인함으로, 관심은 결국 자료의 제한상태하에서 보다 높은 추정결과를 얻을 수 있는 추정식의 개발에 있다고 할 수 있다. 이러한 관점에서 (2.9)식을 임의로 수정하여 줌으로써 (2.13)식과 같은 추정식을 완성하였다.

$$C_w = E_0 + E_1 f_1 + E_2 f_2 + E_3 f_3 + \dots + E_n f_n + h \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_{i,j} f_i f_j \quad (2.13)$$

이 경우 7개의 스테이션 (1, 2.5, 7, 8, 9, 9.75, FP)을 채택함으로써 변수는 35개가 된다.

R^2 은 결정계수(coefficient of determination)라 불리

우는 것으로 다음과 같이 회귀방정식의 신뢰도를 나타내는 계수이다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}$$

여기에서 $m=105$

\hat{Y}_i 는 추정식에 의한 C_w 추정값

Y_i 는 자료에서 읽은 C_w 값

R^2 의 범위는 0과 1사이로써 R^2 의 값이 1에 가까울수록 높은 신뢰도를 갖는다.

이들 회귀방정식의 비교를 Table 1에서 R^2 으로 나타냈다. 따라서 (2.13)식과 같은 스테이션 7개, 변수 35개의 경우가 이들중에서는 가장 신뢰도가 높았으므로 이를 채택하여 Froude수 별로 중회귀분석을 통해 회귀계수를 구했으며, 그 결과를 Table 2에 나타냈다.

Table 2 Coefficients of the regression equation for C_w prediction

Fn	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
H11	.30065E-01	-.99556E+00	-.96880E+01	-.21327E+02	-.10244E+03
H12	.35868E+00	.55253E+01	.18262E+02	.20954E+02	.83884E+02
H13	-.40552E+00	.19203E+01	.80297E+01	.23272E+02	.43913E+02
H14	.30067E+00	-.74412E+01	-.22408E+02	-.39313E+02	-.33414E+02
H15	-.61046E+00	.11864E+01	.12408E+02	.42633E+02	.47931E+02
H16	.62262E+00	-.22300E+00	-.84183E+01	-.49325E+02	-.10388E+03
H17	.18301E+00	.12751E+01	.52028E+01	.62684E+01	-.32083E+02
H22	.72621E+00	-.51560E+01	-.29047E+02	-.88071E+02	-.30955E+03
H23	-.19862E+01	.69349E+00	.36079E+02	.13669E+03	.49571E+03
H24	.62983E+00	.89455E+01	.11677E+02	.23720E+02	.64188E+02
H25	.42300E-01	-.25011E+01	.15520E+00	-.88092E+01	-.80590E+02
H26	-.81508E+00	-.16364E+01	-.85635E+01	-.40512E+01	.77741E+02
H27	.65146E+00	.23463E+01	.30358E+02	.12611E+03	.37937E+03
H33	.87592E+00	.26094E+01	-.12457E+02	-.53757E+02	-.11607E+03
H34	.45291E+00	-.12993E+02	-.29502E+02	-.77447E+02	-.46074E+03
H35	-.78336E+00	.93506E+01	.29060E+02	.73454E+02	.31122E+03
H36	.24310E+01	-.44507E+01	-.31609E+02	-.74205E+02	-.19764E+03
H37	-.11628E+01	.44841E+01	.11888E+02	-.14474E+02	-.11591E+03
H44	-.88001E+00	.84768E+01	.35558E+02	.10266E+03	.43895E+03
H45	.12778E+01	-.14607E+02	-.76610E+02	-.22590E+03	-.68300E+03
H46	-.24303E+01	.10200E+02	.77522E+02	.20483E+03	.36376E+03
H47	.11121E+01	-.76954E+01	-.47270E+02	-.99733E+02	-.16202E+03
H55	-.15796E+00	.55906E+01	.35497E+02	.11936E+03	.33485E+03
H56	.25253E+00	-.63203E+01	-.53101E+02	-.16877E+03	-.33291E+03
H57	-.87312E+00	-.15686E+00	.75724E+00	-.36908E+02	-.22126E+03
H66	.59036E+00	.15768E+01	.11156E+02	.44791E+02	-.20847E+02
H67	.28142E+00	.22857E+01	.19976E+02	.95879E+02	.53045E+03
H77	-.79454E+00	-.51631E+01	-.33536E+02	-.10785E+03	-.39347E+03
E1	.76212E-04	.54920E-03	.42521E-03	.46150E-03	-.28141E-02
E2	-.80138E-04	-.72702E-03	-.19657E-02	-.18917E-02	.34288E-02
E3	.18096E-03	-.81814E-03	-.35394E-02	-.76119E-02	-.23011E-01
E4	.10330E-04	.74517E-03	.20208E-03	-.40748E-02	-.11486E-01
E5	.26529E-03	.16550E-03	.66490E-03	.36825E-02	.11032E-01
E6	-.49023E-03	-.89763E-04	.70246E-03	-.38186E-03	-.31290E-02
E7	.28873E-04	-.19900E-03	-.58172E-03	-.41077E-03	-.12516E-02
0	-.17569E-03	.49989E-03	.45299E-02	.10939E-01	.26239E-01
R**2	.3760	.5002	.6955	.8431	.8881

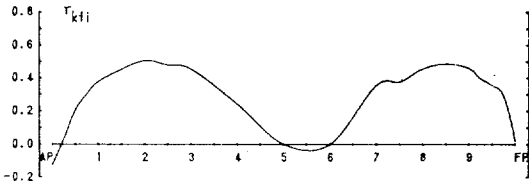


Fig. 5 Correlation coefficients between k and f_i

Table 1 Determination coefficients for C_W prediction

Froude number	Number of variables		
	28	36	35
0.1500	0.4255	0.5232	0.5255
0.1600	0.5389	0.6164	0.6629
0.1700	0.6309	0.7078	0.7528
0.1800	0.7068	0.7677	0.8250
0.1900	0.7704	0.8213	0.8792

여기에서 Froude수가 크면 클수록 R^2 은 증가하는 경향을 보이고 있으며, Froude수가 0.16 이상의 속도에서는 신뢰할 만한 결과를 보이고 있다. Fig. 6은 Froude수 0.18에서의 조파저항계수를 사용된 입력자료값과 본방법에 의해 계산된 값을 비교하고 있다.

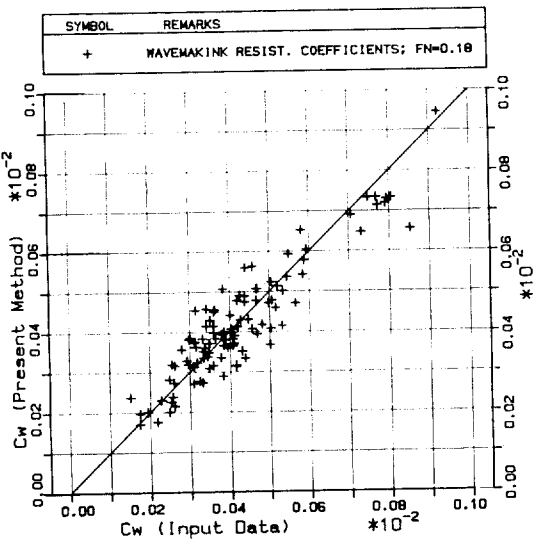


Fig. 6 Wavemaking resistance coefficient prediction by present method

3. 형상저항의 추정

3.1. 형상저항 추정식

본 논문의 자료는 저속 비대선에 대한 해석이므로 형상저항은 중요한 저항성분중의 하나가 된다.

형상저항계수 C_K 는 형상영향계수 k 와 평판마찰저항계수 C_F 의 곱으로써 (3.1)식과 같이 표시된다.

$$C_K = k \cdot C_F \tag{3.1}$$

여기서

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2.0)^2}$$

(1957년 ITTC 곡선)

k 의 추정식은 (3.2)식과 같이 k 와의 상관성이 강한 선형변수와 f_i 로 구성 하기로 하였다.

$$k = f(\text{HFC}) + f(f_i) \tag{3.2}$$

여기에서 HFC=hull form characteristics

3.2. 선형변수의 선정

형상영향계수와 비교적 상관관계가 크다고 판단되는 몇가지 선형변수에 대한 상관 분석을 다음과 같은 절차에 의해 수행했다.

(1) k 와 상관성이 강한 선형변수의 선정

k 와 선형변수의 상관분석 결과를 Table 3에 나타냈으며, 다음의 변수들이 상관성이 강했다($|r| > 0.3$).

$$L/B, B/d, S/\nu^{2/3}, \nu/(0.01L)^3, B/L_r, B/L_e,$$

$$L_e/L, L_r/L, C_b, C_p, C_m$$

(2) 선형변수 상호간의 독립성이 강한 변수의 선정

Table 3 Correlation coefficients between form factor and hull form parameters

Parameter	Correlation coefficient
L/B	-0.3888
B/d	0.3158
$S/\nu^{2/3}$	-0.3760
$\nu/(0.01L)^3$	0.3713
B/L_r	0.6255
B/L_e	0.3829
L_e/L	-0.4373
L_r/L	-0.5132
C_b	0.4977
C_p	0.4865
C_m	0.3741
L_{cb}	-0.2277
L_e	-0.1343
L_r	0.1517

Table 4 Correlation coefficients between hull form parameters

	L/B	B/d	$S/\nabla^{2/3}$	$\nabla/(\cdot 01L)^3$	B/L_r	B/L_e	L_e/L
L/B	1.000	-.576	.793	-.795	-.591	-.611	.338
B/d	-.576	1.000	-.028	.049	.629	.700	-.606
$S/\nabla^{2/3}$	.793	-.028	1.000	-.995	-.472	-.442	.234
$\nabla/(\cdot 01L)^3$	-.795	.049	-.995	1.000	.501	.471	-.259
B/L_r	-.591	.629	-.472	.501	1.000	.812	-.747
B/L_e	-.611	.700	-.442	.471	.812	1.000	-.898
L_e/L	.338	-.606	.234	-.259	-.747	-.898	1.000
L_r/L	.005	-.370	.003	-.032	-.801	-.556	.707
C_b	-.240	.563	-.165	.194	.822	.837	-.965
C_p	-.209	.536	-.151	.180	.811	.824	-.958
C_m	-.536	.642	-.284	.292	.580	.611	-.588
LCB	.460	-.562	.318	-.332	-.444	-.828	.859
L_e	-.071	.149	.132	-.109	-.047	-.185	.270
L_r	-.534	.690	-.258	.297	.558	.766	-.658

	L_r/L	C_b	C_p	C_m	LCB	L_e	L_r
L/B	.005	-.240	-.209	-.536	.460	-.071	-.534
B/d	-.370	.563	.536	.642	-.562	.149	.690
$S/\nabla^{2/3}$	.003	-.165	-.151	-.284	.318	-.132	-.258
$\nabla/(\cdot 01L)^3$	-.032	.194	.180	.292	-.332	-.109	.297
B/L_r	-.801	.822	.811	.580	-.444	-.047	.558
B/L_e	-.556	.837	.824	.611	-.828	-.185	.766
L_e/L	.707	-.965	-.958	-.588	.859	.270	-.658
L_r/L	1.000	-.868	-.875	-.335	.244	.139	-.288
C_b	-.868	1.000	.998	.545	-.694	-.241	.570
C_p	-.875	.998	1.000	.493	-.679	-.261	.546
C_m	-.355	.545	.493	1.000	-.548	.142	.615
LCB	.244	-.694	-.679	-.548	1.000	.269	-.693
L_e	.139	-.241	-.261	.142	.269	1.000	.431
L_r	-.288	.570	.546	.615	-.693	.431	1.000

Table 5 Coefficients of the regression equation for k prediction

L/B	-.25496E+00	H_0	-.30857E+00	$H7.5$	-.21678E+01
B/d	-.49276E+00	$H_{0.25}$	-.35199E+00	$H8.5$	.51613E+00
$S/\nabla^{2/3}$	.14062E+01	H_1	-.10014E+00	$H9.75$	-.21724E+00
B/L_r	.31579E+01	H_2	.41100E+00	H_{10}	-.40924E+00
B/L_e	-.28687E+00	H_3	.68942E-01	0	-.73143E+01
C_b	-.18784E+01	H_4	.15511E+01		
LCB	-.15219E+00	H_7	.19247E+01	R^{**2}	.6985

선형변수 상호간의 상관분석 결과를 Table 4에 나타냈으며, 다음의 변수들이 독립성이 강했다($|r| < 0.6$).

$L/B, B/d, B/L_r, C_p, C_m, L_{cb}, L_e, L_r$

k 와의 상관성이 크면서 상호간의 독립성이 강한 변수

를 고르되, 특별히 L_{cb} 를 추가하였다. 선정된 7개의 변수를 보면 다음과 같다.

$L/B, B/d, S/\nabla^{2/3}, B/L_r, B/L_e, C_b, L_{cb}$

3.3. 스테이션의 선정

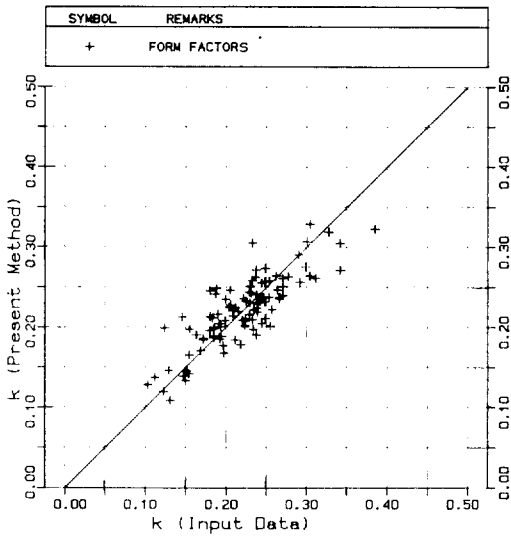


Fig. 7 Form factor prediction by present method

Fig. 3의 스테이션끼리의 상관분석 결과와 Fig. 5의 k 와 스테이션간의 상관분석 결과를 토대로 하여 2.2절과 같은 선정방법으로 다음과 같은 11개의 스테이션을 선정하였다.

AP, 0.25, 1, 2, 3, 4, 7, 7.5, 8, 5, 9, 75, FP

3.4. 회귀분석

(3.2)식으로부터 18개의 변수를 갖는 (3.3)식과 같은 회귀방정식을 완성 하였다.

$$k = A_0 + \sum_{i=1}^{18} A(i)X(i) \tag{3.3}$$

여기에서 $X(1) \sim X(7)$: 선정된 7개의 선형변수
 $X(8) \sim X(18)$: 선정된 11개 스테이션의 f_i 항
 $A(1) \sim A(18)$: 회귀계수
 A_0 : constant

회귀방정식 (3.3)식에 대해서 중회귀분석을 통해 회귀계수를 구했으며 이는 Table 5에 나타냈다. Table 5에서 보듯이 R^2 의 값은 0.6985로서 비교적 신뢰할 수 있는 회귀식이라 판단된다. Fig. 7에서는 사용된 입력자료값과 본방법에 의해 계산된 값을 비교하고 있다.

4. 선형 개량법

본 논문에서는 Hogner의 영향함수(Influence function) [8]를 사용하여 시행 오차범으로 횡단면적곡선의 일부를 개량하도록 시도하였다. 앞의 (2.6)식에 f_i 대신 $f_i + \Delta f_i$ 를 대입하고 Δf_i 의 2차항 이상을 무시하면

(4.1)식과 같이 된다.

$$C_w' = C_w + \frac{\partial C_w}{\partial f_i} \Delta f_i \tag{4.1}$$

여기서 C_w' 는 개량후의 조파저항 추정치이고 Δf_i 는 i 스테이션에서의 $A(x)/A_m$ 의 변화량을 의미한다. 또한 $\partial C_w / \partial f_i$ 를 영향함수라 하며 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial C_w}{\partial f_i} = h \left(\sum_{j=0}^i H_{ji} f_j + \sum_{j=i}^n H_{ji} f_j \right) \tag{4.2}$$

따라서 (4.1)식의 우변 제 2항이 음의 값이 되도록 Δf_i 를 정해주면 조파저항이 줄어드는 결과를 얻게 되며 그 절차 및 제약조건은 다음과 같다.

- i) 영향함수를 구하여 그 부호를 결정한다.
- ii) 영향함수가 “+”이면 그 스테이션에서의 f_i 를 감소시키고,
 “-”이면 f_i 를 증가시킨다.
- iii) 각 스테이션에서의 f_i 변화량은 Fig. 4에 나타난 표준편차값 이내로 한다.
- iv) 횡단면적곡선의 중앙 평행부는 변화시키지 않는다.
- v) 개량후 배수량 변화는 1% 이내로 한다.

본 선형개량법은 조파저항을 감소시키기 위한 것이다. 선형개량에 따라 횡단면적 곡선이 변화하게 되며, 따라서 전체저항의 견지에서 보아 형상영향계수의 계산을 새로하여 함께 검토하였다.

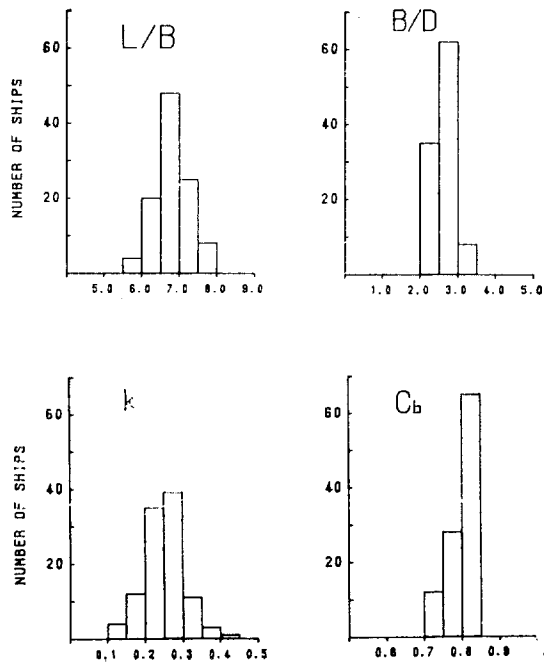


Fig. 8 Data distribution for the statistical analysis

5. 통계자료 정리

본 논문에 활용된 자료는 일본의 "선박"지 (1965년 ~1974년)에 게재된 모형시험 결과들이다. 이 자료는 Schoenherr의 마찰곡선식을 사용하고, 배수량으로 무차원화하여 잉여저항계수로 정리한 것이다. 따라서 ITTC 해석법을 적용하기 위해 먼저 잉여저항계수를 침수표면적으로 환산해준후, ITTC 마찰곡선식으로 환산해 주었다. 그다음 Froude 수가 0.10인 점에서 잉여저항계수를 ITTC 마찰곡선으로 나눈 값을 형상 영향계수로 간주하였다.

선형자료는 총 105척으로서 L/B 범위는 5.5 이상으로 하고, B/d 범위는 3.5 이하이며, C_b 범위는 0.70~0.85사이이다. 그 분포를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 이들 선박의 횡단면적 곡선은 각각 21등분하여 정리하였다.

6. 적용 예

개발된 프로그램의 활용성을 검토해보기 위해 배수량 32,000톤급 산적화물선에 대한 일련의 계산과 선형 개량 그리고 모형시험을 수행하였다.

먼저 기본선형에 대해 조파저항과 형상영향계수를 계산하였다. Fig. 12는 일본 선박지에 게재된 1/29.337의 모형시험 결과치로부터 실선의 전저항계수를 추정 한 것과 본 방법에 의해 추정한 것을 비교하고 있다. 이때 모든 계산은 ITTC 표준해석법에 따라 3차원 해석법, ITTC 마찰곡선을 사용하고, 모형선-실선 상관

수정계수는 공히 0.347×10^{-3} 을 주었다.

다음으로, 기본선형으로부터 배수량 변화가 1%를 벗어나지 않는 범위내에서 횡단면적 곡선을 바꾸어 가며 조파저항을 계산하고, 계산된 조파저항이 비교적 작은 횡단면적곡선 가운데서 선형실체가 무난한 것을 택하였다. 그후 각 스테이션 별로 수정된 횡단면적 수정비율에 따라 폭단을 증감시켜 개량선형을 얻어냈다. 각 스테이션의 증감, 즉 Δf_i 를 Fig. 9에, 그리고 두 선형의 횡단면적 곡선을 Fig. 10에 나타냈다.

이렇게 얻은 기본선형과 개량선형은 축적비 1/70.0의 모형시험을 통해 그 저항성능을 비교하였다. 모형선은 우레탄폼으로 만들어졌고 난류측진 장치로는 9.5

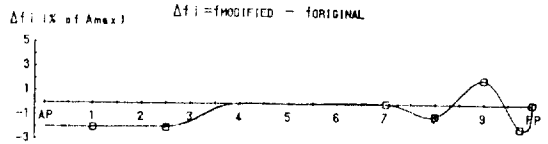


Fig. 9 Modification quantity of sectional areas for the bulk carrier

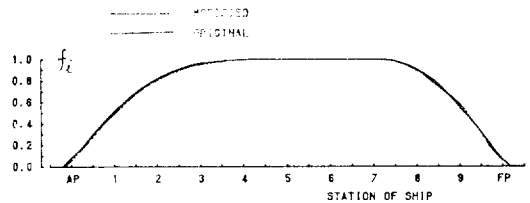


Fig. 10 Comparison of sectional area curves between the original and modified hull forms

Table 6. Principal characteristics of the bulk carrier

DESIGNATION	MODEL NO. :		M416A		M416B	
	SYMBOL(UNIT)		SHIP	MODEL	SHIP	MODEL
Scale ratio	SCALE		70.0000		70.0000	
Length between per.	LPP (m)		176.022	2.5146	176.022	2.5146
Breadth, moulded	B (m)		24.121	.3446	24.121	.3446
Load condition			FULL LOAD		FULL LOAD	
Draft, moulded	F.P.	TF (m)	9.996	.1428	9.996	.1428
	A.P.	TA (m)	9.996	.1428	9.996	.1428
	Mean	TMEAN(m)	9.996	.1428	9.996	.1428
Length of waterline	LWL (m)		180.440	2.5777	180.440	2.5777
Wetted surface area	S (m ²)		6416.0	1.3094	6416.0	1.3094
Displacement volume	DISV(m ³)		32433.	.0946	32169.	.0938
Block coefficient	CB		.7640		.7580	
Midship sect. coef.	CM		.9900		.9900	
Prismatic coef.	CP		.7717		.7657	

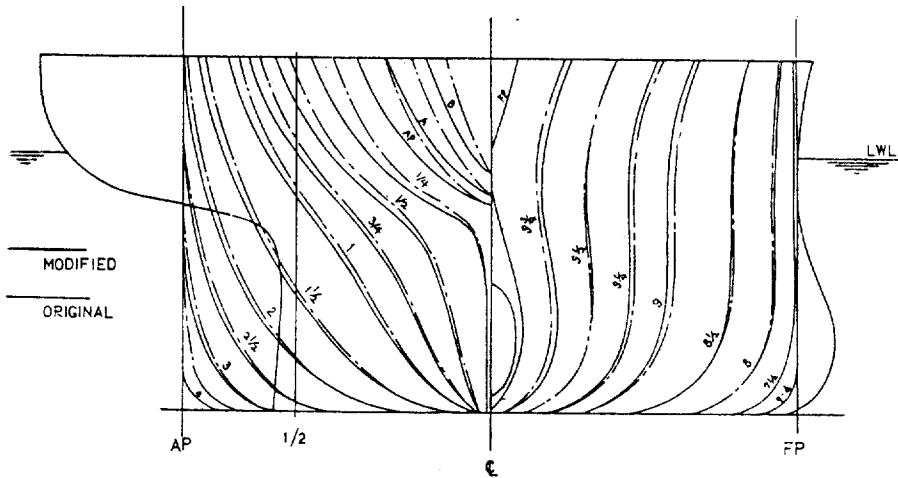


Fig. 11 Comparison of body plan between the original and modified hull forms

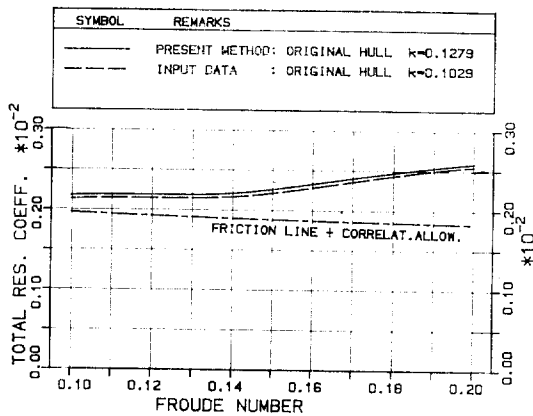


Fig. 12 Comparison of total resistance coefficient between the input data and prediction results

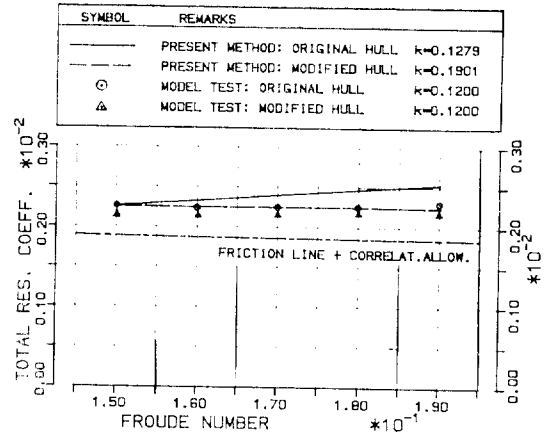


Fig. 13 Comparison of total resistance coefficient between the original and modified hull forms

스테이션에 높이 2mm, 직경 1mm의 못을 10mm 간격으로 박았다. 기본선형과 개량 선형의 주요치수는 Table 6에 정리되어 있으며, 두 선형에 대한 선도를 Fig. 11에 비교하였다.

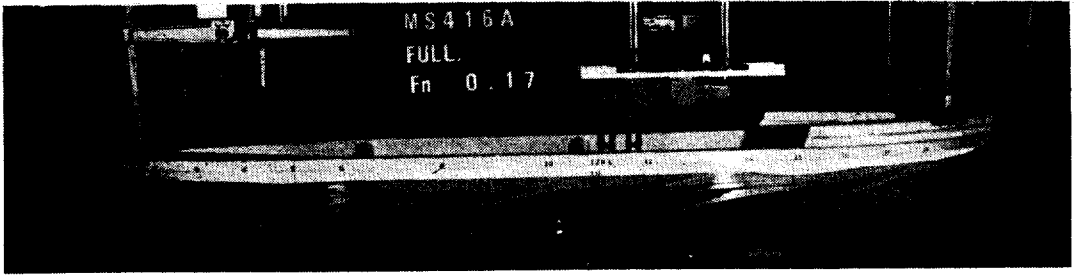
Fig. 13은 기본선형과 개량선형에 대해 축척비 1/70.0의 모형시험 결과와 본 방법에 의해 추정된 값을 실선 전저항계수로 비교하고 있다. 이 계산도 3차원해석법, ITTC 마찰곡선을 사용하고 모형선-실선상관수정계수는 0.347×10^{-3} 을 주었다. Fig. 13의 $Fn=0.17$ 에서 본 방법에 의한 추정치들을 비교할때는 개량선형이 기본선형에 비해 전저항계수가 6%절감되었고, 모형시험

결과치들을 비교할 때에는 4% 절감되었다. 이는 배수량이 0.8% 감소한데 비해 저항은 많이 감소되었다고 판단된다.

한편 기본선형의 $Fn=0.17$ 에 대해서 Fig. 12의 일본 선박지에 실린 1/29.337 모형시험 결과와 Fig. 13의 본 연구를 통해 실험된 1/70 모형시험 결과는 전저항계수로 6% 가량의 차이를 보이고 있는데, 이는 1/70 모형시험의 경우 실험시 모형선의 레이놀드수가 너무 작을때 대한 실험오차로 판단된다.

Fig. 14는 기본선형과 개량선형의 저항시험시에 생기는 선속파형을 비교하고 있다.

(Original Hull Form)



(Modified Hull Form)

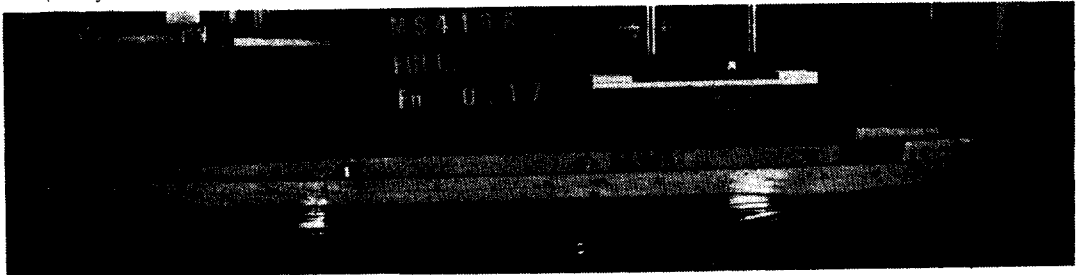


Fig. 14 Comparison of the running ship models

7. 결 론

통계해석에 의해 저속비대선의 저항성능을 추정하는 방법을 연구하였다. 일본 선박지에 실린 105척의 저속비대선 자료들로부터 조파저항계수와 형상영향계수의 추정식을 각각 얻었고 선형개량기법도 정립하였다.

조파저항계수 추정식은 조파저항이론을 이용하여 회귀식을 만든후 회귀분석하여 얻었다. 이때 Froude 수가 증가함에 따라 신뢰도도 점차 좋아졌는데 Froude 수 0.16과 0.18에서 결정계수 R^2 은 각각 0.6955와 0.8431로서 신뢰도가 높아 활용가치가 있다고 판단된다. 형상영향계수 추정식은 선체주요치수, 횡단면적계수들을 순수하게 회귀분석하여 얻었다. 이때 결정계수 R^2 은 0.6985로서 이 또한 유용하게 활용할 수 있는 식이라 판단된다. 조파저항계수를 최소화시키는 본 선형개량기법은 횡단면적곡선의 최적화 견지에서 유용하게 활용될 수 있으리라 본다.

배수량 32,000 톤급 산적화물선에 이들 방법을 적용하여 선형을 수정하였고, 모형시험을 통해 실선 전저항계수가 4%감소됨을 보였다.

후 기

본 연구의 일부는 인하대학교 산업과학기술연구소

연구비의 지원으로 이루어진 것이다. 관계 제위께 감사할 드린다.

참 고 문 헌

- [1] H. Maruo, 조파저항이론개설, 일본조선협회지, 434호, 1965.
- [2] Tagano, H., "The Estimation Method of Ship Resistance", Doctoral Thesis, Osaka University, 1975.
- [3] Wen-Cheng Lin, "Bare Hull Resistance Prediction for Naval Auxiliary Ships", DTNSRDC, TM 116-83, 1983.
- [4] Mishima, S. et al., "A Study on the Hull Form Design (Part I)", Mitsui Zosen Technical Review No. 121, 1984.
- [5] 박성현, 허문렬, "전산통계", 경문사, 1983.
- [6] 유지성, "통계학", 탑출판사, 1983.
- [7] Gross, A. and Watanabe, K., "Form Factor", Report of Performance Committee, Appendix 4, 13th ITTC, 1972.
- [8] Hogner, E., "Influence Lines for the Wave Resistance of Ships-I", Proceedings of the Royal Society, Series A, Vol. 155, 1938.