

수학적 선형의 저항특성 추정 및 선형 최적화에 대한 연구

민계식^{†*}, 이연승^{**}, 강선형^{**}, 한범우^{**}

현대중공업^{*}, 현대중공업 선박해양연구소^{**}

Study on the Resistance Prediction and Hull Form Optimization for Mathematical Hull Forms

Keh-Sik Min^{*}, Yeon-Seung Lee^{**}, Seon-Hyung Kang^{**} and Bum-Woo Han^{**}

Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.^{*}

Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.^{**}

Abstract

In order to prepare the fuel-economic hull form design method for fine higher-speed ships, systematic theoretical and experimental study has been performed on the relation between hull form characteristics and ship's resistance and on the effect of the optimization of main hull form characteristics.

The results of this study provide not only a great insight into the relation between ship's resistance and hull form characteristics, but also a proper direction of the optimization of main hull form characteristics for the improvement of ship's resistance characteristics.

※Keywords: Fine higher-speed ships(고속세장선), Fuel-economic hull form(연료경제선형), Optimum waterline shape(최적출수형상), Resistance characteristics(저항특성), Main hull form characteristics(주요선형특성)

1. 서 론

조선소 운영에 있어서 가장 중요한 핵심기술 중의 하나로 "선형설계기술"을 들 수 있다. 선형설계의 중요성에 대해서는 아무리 강조를 하여도 지나침이 없을 것이다. 선형설계는 여러 면에서

접수일: 2004년 2월 12일, 승인일: 2004년 3월 28일

† 주저자, E-mail: minks@hhi.co.kr

Tel: 052-235-9114

중요하지만 그 중에서도 두가지면, 즉 선박건조를 위한 첫 단계로서, 그리고 선박운영의 경제성을 좌우하는 지표로서 특히 중요하다고 할 수 있다. 따라서 우수한 선형을 신속히 설계할 수 있는 능력을 보유하는 것이 조선소 운영상 극히 필요하다. 저자는 선형설계의 중요성을 인지하고 오래 전부터 이론적 선형설계에 대한 연구를 수행하여 오고 있다 (민계식/김근제 1984), (Min/Kang 1998). 본 연구에서는 Havelock 소스 분포에 의

한 선형 얇은배 이론(linearized thin-ship theory)을 활용하여 고속세장선의 선형설계방법을 확립하기 위한 체계적인 이론적·실험적 기초연구를 수행하였다. 그리고 나아가서 선박의 저항추진 특성에 대하여 좀더 종합적인 면(overall aspect)을 살펴볼 수 있도록 “주요특성 최적화에 대한 수치적 연구”도 수행하였다. 본 연구의 연구내용을 구체적으로 언급하자면 다음과 같다 :

- 이론적 저항추정
- 설계흡수선식(equation of DLWL)의 영향
- 흘수형상 최적화
- 종합적 최적화(주요특성 최적화)

사실 위의 연구항목 하나하나가 대형 연구과제이다. 본 연구에서는 위의 항목 각각에 대하여 먼저 철저한 이론적 연구를 수행한 후 가능한 한 실험적 연구도 수행하여 그 두 가지 결과를 서로 비교하여 봄으로써 이론적 연구의 타당성을 검증하고자 하였다.

모든 시험은 현대중공업 선박해양연구소 예인수조(towing tank)에서 수행하였다. 본 연구를 위한 시험은 모형시험과는 성격이 다르다. 왜냐하면 선정된 또는 설계된 선형에 따라 제작된 선박이 모형선이 아니라 이론적 추정 및 계산결과를 검증하기 위한 실제 선박이기 때문이다. 따라서 모형시험이 아니라 수조시험, 또는 저항시험이라고 부르는 것이 타당하다.

이미 언급한 바와 같이 본 연구는 저항추진 성능이 우수한 고속세장선의 연료경제선형 설계방법을 확립하기 위한 기초연구로 수행되었으며 연구내용 및 결과를 요약 정리하여 논의하고자 한다.

2. 이 론

2.1 저항추정 방법

이론적 저항추정을 위하여 전통적인 저항이론과 잉여저항에 대한 선형 얇은배 이론을 활용하였다. 선형과 선체주위의 유동특성을 나타내기 위하여 Fig. 10에 보이는 바와 같은 좌표계를 도입하였다. Fig. 1에서,

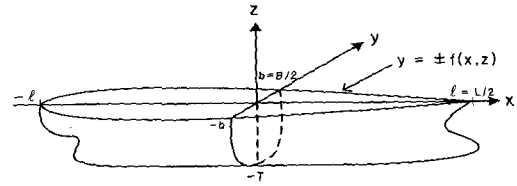


Fig. 1 Coordinate system for the presentation of hull form and flow characteristics around a ship hull

$$y = \pm f(x, z) \tag{1}$$

는 선형을 나타내는 식, 즉 선형식을 의미한다.

조선학의 전통적인 저항이론에 의하면 선박의 전체저항은 다음과 같이 마찰저항과 잉여저항의 합으로 표시 된다 :

$$R_T = R_F + R_R \tag{2}$$

식 (2)에서 R_T 는 전체저항이고 R_F 와 R_R 는 각각 마찰저항과 잉여저항을 나타낸다. 마찰저항은 다음과 같이 표시 된다 :

$$R_F = \frac{1}{2} \rho C_F (R_N) v^2 S \tag{3}$$

마찰저항식 (3)에서 ρ , C_F , v , S 는 각각 유체밀도, 마찰저항계수, 선박의 속도 및 점수표면적(wetted-surface area)을 나타내며 마찰저항계수, C_F 는 ITTC-57 마찰곡선(correlation line)에 따라 레이놀즈수(Reynolds Number)의 함수로 나타내어진다.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} R_N - 2)^2} \tag{4}$$

마찰저항식 (3)에서 점수표면적 S 의 정확한 수학적 표현은 다음과 같다 :

$$S = 2 \int_{-l}^l \int_{-T}^0 \sqrt{1 + (f_x)^2 + (f_z)^2} dx dz \tag{5}$$

식 (5)에서 f_x 와 f_z 는 선형식 $f(x, z)$ 의 x -방향과 z -방향에 대한 편미분을 의미한다.

선체주위의 압력분포로 인하여 발생하는 저항성

분, 즉 잉여저항은 다음과 같이 상징적으로 나타낼 수 있다 :

$$R_R = \int \int_S P n_x dS \quad (6)$$

잉여저항식 (6)에서 P와 n_x 는 각각 선체주위의 압력과 내향 단위법선 vector \vec{n} 의 x-방향 성분을 나타낸다. 잉여저항식 (6)은 선형화된 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같이 표시된다 :

$$R_R \approx -\rho v \int \int \phi_x n_x dS \quad (7)$$

자유표면을 고려하여 선체 종양면에 Havelock 소스를 분포시킨 선체 소스를 잉여저항식 (7)에 대입하고 얇은배 이론을 적용함과 동시에 기여가 없는 항을 제거하면 잉여저항에 대한 유명한 Michell's Integral을 얻게된다(Wehausen 1962) :

$$R_R = \frac{4\rho g^2}{\pi v^2} \int \int_S dx dz \int \int_S d\xi d\zeta f_x(x, z) f_\xi(\xi, \zeta) \times \int_0^{\frac{1}{2}\pi} d\theta \sec^3 \theta e^{-\frac{g}{v^2}(z+\zeta)\sec^2 \theta} \cdot \cos \left[\frac{g}{v^2}(x-\xi)\sec \theta \right] \quad (8)$$

수치해석의 편의를 위하여 잉여저항식 (8)에서 $\sec \theta$ 를 $\cosh u$ 로 치환하고 다음의 부호들을 사용하면 잉여저항식은 다음과 같이 된다 :

$$R_R = A \int_0^\infty du \cosh^2 u [P^2(\cosh u) + Q^2(\cosh u)]$$

$$\begin{matrix} P(\cosh u) \\ Q(\cosh u) \end{matrix} = \int \int dx dz f_x(x, z) \cdot e^{\beta z} \cdot \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix}(\alpha x)$$

$$A = \frac{4\rho g^2}{\pi v^2}, \quad \alpha = \frac{g}{v^2} \cosh u, \quad \beta = \frac{g}{v^2} \cosh^2 u \quad (9)$$

전체저항은 마찰저항과 잉여저항의 합으로 이루어지므로 전체저항식은 다음과 같이 표시된다 :

$$R_T = \rho C_F v^2 \int \int \sqrt{1 + (f_x)^2 + (f_z)^2} dx dz + A \int_0^\infty du \cosh^2 u [P^2(\cosh u) + Q^2(\cosh u)] \quad (10)$$

전체저항식 (10)의 A는 잉여저항식 (9)의 경우와 동일하다.

2.2 선형식

저항이 최소가 되는 선형을 구하기 위한 다음 단계로서 선형을 수학적으로 나타내기 위한 적절한 수식을 고안하여야 한다. 이러한 선형식은 복잡한 실제선형을 잘 표현할 수 있어야 할 뿐만 아니라 저항식에 대입하였을 때 수학적 취급이 가능하도록, 될수록 간단하여야 한다. 그러나 취급 가능한 간단한 식으로 복잡한 선형을 잘 표현하기란 결코 쉬운 일이 아니다.

수학적 선형식에 대한 연구의 초기단계로 오래 전부터 조선공학자들 사이에 다음과 같은 간단한 변수분리형 선형식이 사용되어 오고 있으며 이러한 형태의 선형을 기초선형(elementary hull form)이라고 부르기도 한다.

$$y = \pm f(x, z) = \pm \frac{B}{2} X(x) \cdot Z(z) \quad (11)$$

여기서 X(x)와 Z(z)는 각각 수선면(waterline plan)과 횡단면(body plan)을 나타낸다.

상징적 선형식 (11)을 살펴보면 횡단면형상이 종방향에 관계없음을 알 수 있다. 다시 말해서 수선면 형상과 횡단면 형상은 서로 독립이다. 그러나 실제선박에 있어서 횡단면 형상은 종방향 위치에 따라 변화하게 된다. 따라서 저자는 횡단면 형상을 종방향 위치에 따라 설계자가 임의로 변화시킬 수 있는 새로운 형태의 2가지 횡단면식을 준비하였다. 저자가 준비한 선형식을 상징적으로 표현하면 다음과 같다 :

$$y = \pm f(x, z) = \pm \frac{B}{2} X(x) \cdot Z(x, z) \quad (12)$$

본 연구(제 1단계 연구)에서 주로 사용한 선형식에 대하여 논의하고자 한다.

수선면식(Equation of Waterline Plan)

저자는 오랜 기간에 걸쳐 많은 수식을 시험하여 본 결과 본 연구의 대상선인 고속세장선의 설계를 수선 형상에 대해서는 취급과 응용 면에서 다항식

형이 적합하다는 결론에 도달하게 되었다. 그리고 4차 다항식으로부터 10차 다항식까지의 모든 가능한 조합에 대하여 설계출수선식의 영향에 대한 방대한 기초연구를 수행하였으며 선형설계방법에 대한 제 1단계 연구, 즉 본 연구에서는 다음과 같은 5항 6차 다항식을 채택하였다.

$$X(x) = [1 + a_2(x/\ell)^2 + a_3|x/\ell|^3 + a_4(x/\ell)^4 + a_6(x/\ell)^6] \quad (13)$$

식 (13)에서 a_2, a_3, a_4, a_6 는 전체저항이 최소가 되는 선박의 형상을 설계하기 위하여 앞으로 구하여야 할 미지계수(unknown coefficient)이며 ℓ 은 선수부의 길이(entrance length)이다. 또한 설계출수선은 다음의 경계조건을 만족하여야 한다.

$$X(0) = 1, X'(0) = 0, X(\pm \ell) = 0 \quad (14)$$

횡단면식(Equation of Body Plan)

실제 선박의 횡단면 형상을 잘 표현하면서도 단면형상을 종방향의 위치에 따라 임의로 변화시킬 수 있는 선형식을 고안해 내는 것은 결코 쉬운 일이 아니며 지금까지 전 세계적으로 크게 성공한 예가 없다. 그러나 저자는 세계 최초로 극히 간단하면서도 실제 선박의 단면형상을 잘 표현할 뿐만 아니라 종방향(x-방향)의 위치에 따라 단면형상을 설계자의 마음대로 변화시킬 수 있는 횡단면식을 고안하였다.

저자가 고안한 횡단면식은 다음의 두 가지이다 :

제 1 단면 : $Z(x, z) = [1 + (z/T)]^{n(x)}$ (15)

제 2 단면 : $Z(x, z) = 1 - |z/T|^{n(x)}$ (16)
 $-T \leq z \leq 0$

식 (15)와 (16)에서 T는 선박의 출수(draft)를 나타낸다. 식 (15)와 (16)에서 지수 n을 체계적으로 변화시키면 Fig. 2와 3에서 볼 수 있는 바와 같이 곡선의 형상이 오목형상으로부터 볼록형상에

아르기까지 체계적으로 변화하게 되며 그러한 곡선의 형상을 사용하여 실제 선박의 횡단면 형상을 잘 표현할 수 있다.

그러나 본 연구에서는 단면형상이 중요하지 않으므로 수학적 취급이 좀 더 용이한 제 2 단면식을 사용하기로 하였다.

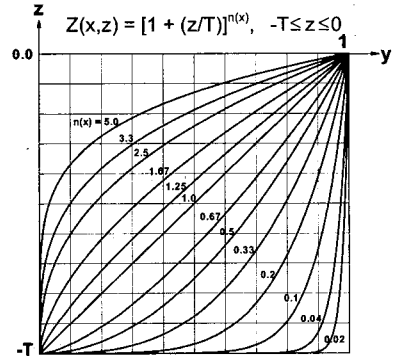


Fig. 2 Variation of No. 1 section shape according to the variation of exponent n

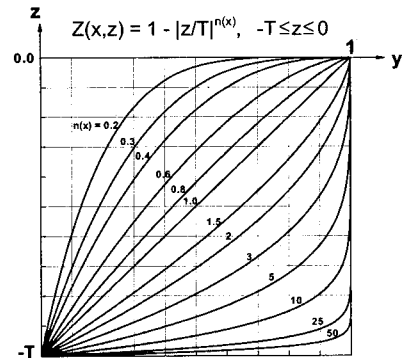


Fig. 3 Variation of No. 2 section shape according to the variation of exponent n

2.3 출수형상 최적화

전통적인 저항이론은 정량적으로는 활용가치가 적지만 정성적으로는 매우 유용하게 활용될 수 있다. 선형 최적화, 특히 출수형상 최적화는 전통적 저항이론의 성공적인 정성적 이용 예 중의 대표적인 경우라고 할 수 있다.

마찰저항 계산을 위하여는 식 (5)로 표현되는

접수표면적을 계산하여야 하는데 선형 최적화를 위한 과정에서 식 (5)로 표현되는 정확한 접수표면적 식은 수학적으로 취급이 불가능할 뿐만 아니라 잉여저항에 대해서 오늘날 선형화된 얇은배 이론을 쓸 수밖에 없으므로 일관성을 위해서, 그리고 수학적으로 취급이 가능하도록 다음과 같이 선형화한다.

$$S \approx 2 \int_{-\ell}^{\ell} \int_{-T}^0 \left[1 + \frac{1}{2}(f_x)^2 + \frac{1}{2}(f_z)^2 \right] dz dx \quad (17)$$

이때 선형화된 전체저항식은 다음과 같이 표시된다 :

$$R_T = \rho C_F V^2 \iint \left[1 + \frac{1}{2}(f_x)^2 + \frac{1}{2}(f_z)^2 \right] dx dz + A \int_0^{\infty} du \cosh^2 u [P^2(\cosh u) + Q^2(\cosh u)] \quad (18)$$

최적출수형상, 즉 저항이 최소가 되는 출수형상을 구하기 위하여 저항식을 선형식의 미지계수로 나타낼 필요가 있다. 그러기 위하여 설계출수선식 (13)과 단면식 (15), 또는 (16)의 조합으로 구성된 선형식 (12)를 전체저항식 (18)에 대입하고 복잡하고 지루한 수학적 처리를 하면 다음과 같이 선형식의 미지계수로 표현되는 전체저항식을 얻게 된다.

$$R_T = R_0 + R_2 a_2 + R_3 a_3 + R_4 a_4 + R_6 a_6 + R_{22} \left(\frac{1}{2} a_2^2 \right) + R_{23} (a_2 a_3) + R_{24} (a_2 a_4) + R_{26} (a_2 a_6) + R_{33} \left(\frac{1}{2} a_3^2 \right) + R_{34} (a_3 a_4) + R_{36} (a_3 a_6) + R_{44} \left(\frac{1}{2} a_4^2 \right) + R_{46} (a_4 a_6) + R_{66} \left(\frac{1}{2} a_6^2 \right) \quad (19)$$

선형계수로 표현된 전체저항식 (19)에서 R_0, R_2, \dots, R_{66} 은 앞으로 최적화될 선형식의 미지계수 a_2, a_3, a_4, a_6 등의 저항계수들이다.

최적화를 위하여 라그랑주 승수방법(Lagrangian Multiplier Method)을 채택하였으며 우선 선형식의 미지계수 a_i 와 라그랑주 승수(Lagrangian Multiplier) λ, μ 로 표시되는 라그랑주 방정식

(Lagrangian Equation)을 구성하여야 한다. 그러기 위하여 전체저항식과 함께 다음의 경계조건을 활용하였다.

- 목적함수 : 전체저항

$$f_1 = R_T = R_F + R_R \quad (20)$$

- 경계 조건

폐쇄조건 :

$$f_2 = f(\ell, 0) = \frac{B}{2} (1 + \sum_{i=2}^6 a_i) = 0 \quad (21)$$

일정체적 :

$$f_3 = \int_{-\ell}^{\ell} \int_{-T}^0 f(x, z) dz dx - V = 0 \quad (22)$$

그러면 라그랑주 방정식은 다음과 같이 형성된다.

$$T(a_i, \lambda, \mu) = f_1 + \lambda f_2 + \mu f_3 \quad (23)$$

라그랑주 방정식 (23)을 다음과 같이 선형식의 미지계수 a_i 와 라그랑주 승수 λ 및 μ 에 대하여 편미분하고 0으로 놓으면 즉,

$$\frac{\partial T}{\partial a_i} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \lambda} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \mu} = 0 \quad (24)$$

그러면 선형식의 미지계수와 라그랑주 승수에 대하여 다음과 같은 형태의 선형 연립방정식계를 얻게 된다.

$$A \cdot X = B \quad (25)$$

식 (25)로 표현되는 선형 연립방정식계의 해를 구함으로써 저항이 최소가 되는 선형식을 구하게 된다.

3. 이론적 저항추정

이론적 저항추정의 정확성(accuracy)과 실제 응용가능성을 살펴보기 위한 검증용 선형으로 간단한 기초선형을 선정하였으며 선정된 기초선형을

기본선형(Basic Hull Form), 또는 단순 수학적 선형(Simple Mathematical Hull Form)이라고 부르기 하였다. 그러나 편의를 위하여 앞으로는 단순 수학적 선형의 명칭을 더 줄여서 단순선형(Simple Hull Form : SHF)이라고 부르고자 한다. 선정된 단순선형의 선형식은 아래와 같으며 Table 1에는 검증용 선의 주요특성이 정리되어 있다.

$$y = \pm f(x, z) = \pm b \cdot X(x) \cdot Z(z) \\ = \pm b[1 - (x/\ell)^2] \cdot [1 - |z/T|^2] \quad (26)$$

Table 1 Main characteristics of the simple hull form for verification

Length P. P. (L _{PP}) or Waterline Length(L _{WL})	8.000 m
Beam (B)	0.800 m
Draft (T)	0.320 m
Volume (V)	0.910 m ³
Block Coeff. (C _B)	0.444
Waterplane Area Coeff. (C _w)	0.667
Length/Beam Ratio (L/B)	10.0
Beam/Draft Ratio (B/T)	2.5
Length/Draft Ratio (L/T)	25.0

Fig. 4와 5는 단순선형의 전체저항계수 및 전체저항에 대한 계산결과와 시험결과와의 비교를 보여주고 있다. Fig. 4와 5로부터 이론적 저항추정의 정량적인 면(quantitative aspect)을 살펴보면 저속영역(low Froude Number region)에서는 측정값보다 크게 추정되고 고속영역에서는 적게 추정됨을 알 수 있다. 정성적인 면(qualitative aspect)을 살펴볼 때 이론은 저속영역에서는 선수파와 선미파 사이의 간섭현상을 과장하는 경향이 있으나 중속 및 고속영역으로 갈수록 일반적인 경향이 측정결과와 만족할 만큼 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히 프루드수(Froude Number) 0.3 근처에서의 산(hump)과 0.35 근처에서의 골(hollow) 및 0.5 근처에서의 최종 산(final hump)에 대한 정성적 경향은 시험결과와 놀랄 만큼 잘 일치하고 있다.

Fig. 6은 이론적 추정결과와 시험결과 사이의

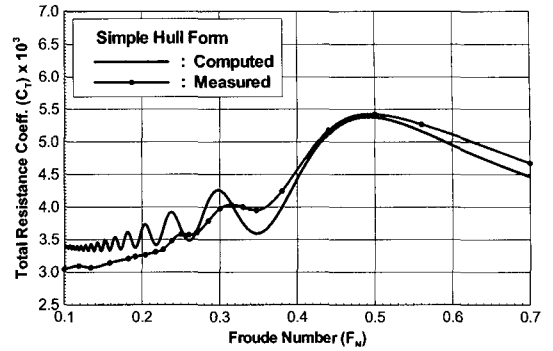


Fig. 4 Comparison of C_T between computed and test results for SHF

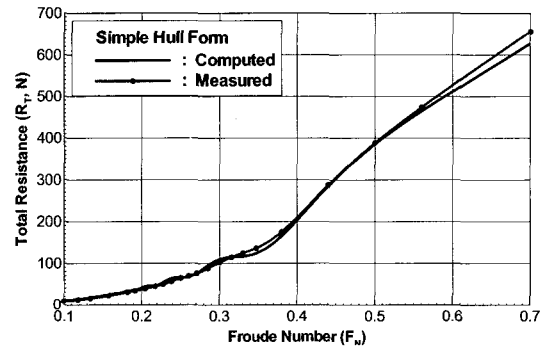


Fig. 5 Comparison of R_T between computed and test results for SHF

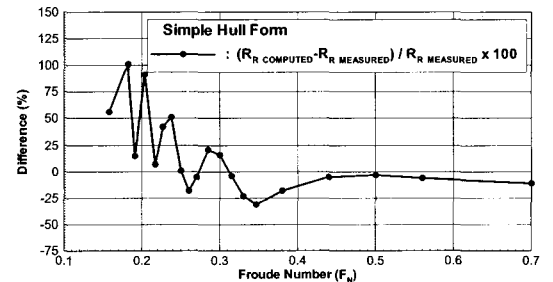


Fig. 6 Difference between computed and measured C_T for SHF

차이를 보여주고 있으며 이론적 방법에 의한 계산결과와 모형시험 결과와의 차이는 일반적으로 프루드수가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

다시 말해서 이론적 방법에 의한 계산결과와 모형 시험 결과는 일반적으로 프루드수가 증가할수록 서로 접근하게 되어 이론적 계산이 정성적으로는 물론이고 정량적으로도 충분히 실용 가능한 상태가 된다.

4. 설계출수선의 영향

출수형상 최적화를 위하여 설계출수선의 형상을 미지계수를 포함한 방정식으로 나타내고 전체저항이 최소가 되도록 선형계수를 구하였다. 이때 사용하는 방정식에 따른 최적출수형상의 변화와 저항값의 변화를 조사해 보기 위하여 다음과 같은 다항식을 도입하고 4항으로부터 최대 10항까지 시험하여 보기로 하였다.

$$X(x) = 1 + a_2 \left(\frac{x}{\ell}\right)^2 + a_3 \left|\frac{x}{\ell}\right|^3 + a_4 \left(\frac{x}{\ell}\right)^4 + a_5 \left|\frac{x}{\ell}\right|^5 + \dots + a_{10} \left(\frac{x}{\ell}\right)^{10} \quad (27)$$

그러니까 두 가지 단면형상에 대하여 다섯 가지 형상지수와 다섯 가지 방형계수, 그리고 다섯 가지 프루드수를 체계적으로 변화시켜 가면서 4항 다항식으로부터 10항 다항식까지 모든 가능한 조합에 대하여 최적출수형상을 설계하고 그때의 저항값을 계산하였다. 이것은 도합 116,500가지의 조합에 대한 실로 엄청난 양의 계산이다. Table 2는 위의 조합 및 계산의 수를 일목요연하게 보여 주고 있다. Fig. 7은 수선면적계수와 프루드수가 일정할 때 출수선을 나타내는 수식에 따른 최적출수형상의 변화에 대한 예를 보여주고 있다.

설계출수선의 영향에 대한 연구에 있어서는 연구의 양이 방대할 뿐만 아니라 뚜렷한 결론을 내리기가 쉽지 않으므로 추후 별도의 논문에서 연구결과를 논의하고자 한다. 이미 언급한 바와 같이 본 연구에서는 식(13)으로 표현되는 5항 6차 다항식을 사용하기로 하였다.

5. 출수형상 최적화

본 연구에서는 설계출수선의 최적화가 저항특성

Table 2 Total number of optimum waterline shape designs and resistance calculations

Design Variable	Description	Number
Section Shape	No. 1 Section : $Z(z) = (1 + z)^n$	2
	No. 2 Section : $Z(z) = 1 - z ^n$	
Form Exponent (n)	No. 1 Section : $\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{7}$	5
	No. 2 Section : 3, 4, 5, 6, 7	
Block Coeff. (C_B)	0.400, 0.450, 0.500, 0.525, 0.550	5
Froude Number (F_N)	0.200, 0.225, 0.250, 0.275, 0.300	5
Terms of Polynomial	4 - term : ${}_9C_3$	84
	5 - term : ${}_9C_4$	126
	6 - term : ${}_9C_5$	126
	7 - term : ${}_9C_6$	84
	8 - term : ${}_9C_7$	36
	9 - term : ${}_9C_8$	9
	10 - term : ${}_9C_9$	1
Total Number of Cases : $2 \times 5 \times 5 \times 5 \times 466$		116,500

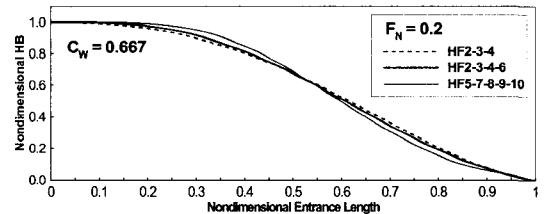


Fig. 7 Variation of the optimum waterline shape according to different waterline equations

에 미치는 영향에 대해서도 심도 있게 연구를 수행하였다. 그러기 위하여 Table 1에 정리되어 있는 바와 같은 단순선의 주요특성과 동일한 주요특성을 유지하면서 프루드수 0.2, 0.3, 0.5 각각에 대하여 출수형상이 최적화된 3가지 선형을 설계하였다. 따라서 4가지 검증용선, 즉 단순선과 3가지 출수형상 최적화선의 주요특성은 모두 동일하다. 문제의 복잡성을 피하기 위하여 본 연구를 위한 기본조건, 즉 제한조건을 다음과 같이 선정하였다.

- 동일한 주요치수, 즉 동일한 선체길이, 폭 및 수심
- 동일한 수중체적, 즉 동일한 방형계수 (constant C_B)

Fig. 8은 동일 주요특성을 갖는 단순선형의 설계흘수선 형상과 위의 3가지 프루드수 각각에 대하여 최적화된 설계흘수선 형상과의 차이를 보여주고 있다. 즉 Fig. 8에서 WHF-1, WHF-2, WHF-3는 각각 프루드수 0.2, 0.3, 0.5에서 설계흘수형상이 최적화된 선형 (Waterline-optimized Hull Form)을 나타낸다.

Fig. 9는 이론적 저항추정의 정확성을 검토하여 보기 위한 단순선형의 모형선과 흘수형상 최적화의 타당성을 검증하기 위한 3가지 선형의 소형선, 도합 4가지 검증용 소형선을 보여주고 있다.

지면관계상 3가지 흘수형상 최적화 선형 모두의 저항특성에 대하여 자세히 논의하기는 어려우

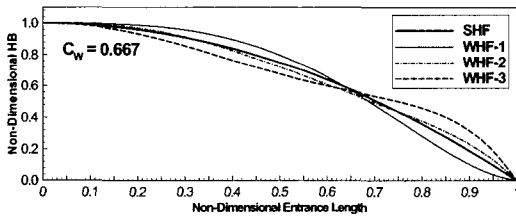


Fig. 8 Comparison of waterline shapes between SHF and 3 WHFs



Fig. 9 The simple and 3 waterline-optimized hull form ships (SHF, WHF-1, WHF-2 and WHF-3)

므로 대표적으로 프루드수 0.5인 경우에 대해서만 간략히 논의를 하고자 한다. Fig. 10과 11은 프루드수 0.5에서 최적화된 선형의 저항특성을 보여주고 있다. 그러나 Fig. 10과 11에서 이론적 계산 시에는 트림(trim)이 없는 것으로 가정하였으나 시험은 트림이 자유롭게 발생할 수 있는 상태에서 수행하였으므로 선속이 증가할수록 두 가지 경우의 조건이 달라지게 된다. 따라서 트림이 발생하지 않도록 모형선을 고정시키고 저항시험을 다시 수행하여 보았으며 Fig. 12와 13은 이때의 이론적 계산결과와 저항시험 결과와의 비교를 보여주고 있다.

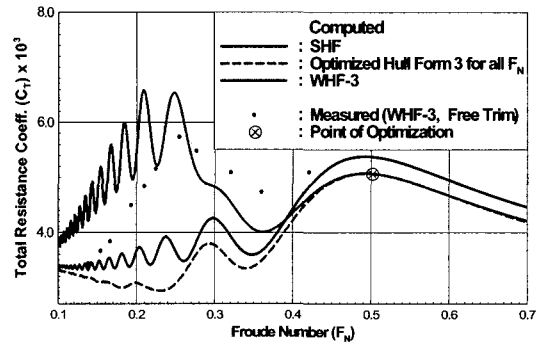


Fig. 10 Comparison of C_T between SHF and WHF-3

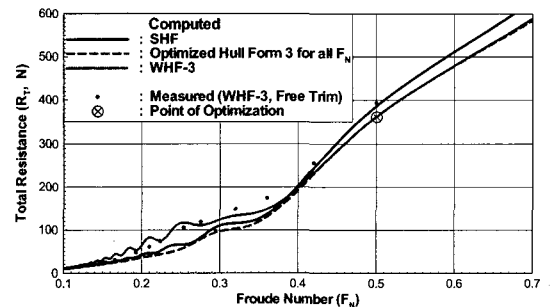


Fig. 11 Comparison of R_T between SHF and WHF-3

여기서 한가지 언급하여야 할 것이 있다. 다음이 아니라 Fig. 10과 11은 모든 프루드수에 대하여 흘수형상이 최적화된 선형에 대한 이론적 저항

특성의 추정도 보여주고 있는데 이것은 가상적인 것이라는 점이다. 왜냐하면 모든 프루드수에 대하여 최적화된 선박이란 있을 수 없기 때문이다. 구체적인 수치 결과 및 비교는 종합적인 최적화에서 논의하고자 한다.

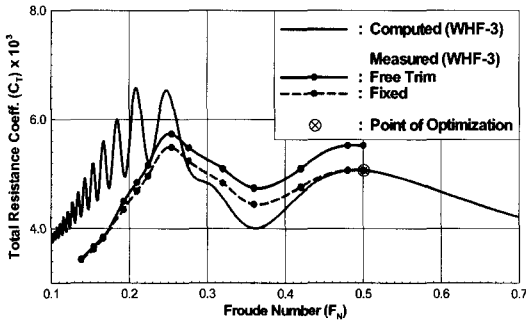


Fig. 12 Total resistance coefficient of WHF-3

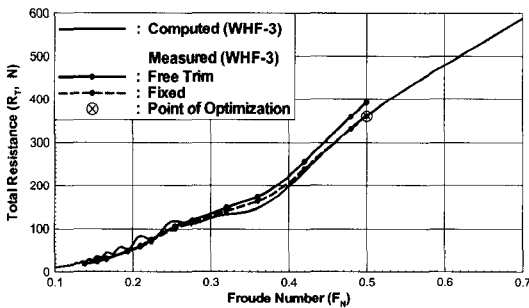


Fig. 13 Total resistance of WHF-3

6. 종합적 최적화

“흘수형상 최적화”에서는 주어진 선속에 대하여 수선하 체적과 주요치수를 일정하게 유지하면서 흘수형상을 최적화함에 따른 저항특성의 변화에 대하여 살펴보았다. 그러나 좀더 종합적인 면(overall aspect)에서 저항특성을 살펴볼 필요가 있다. 즉 주어진 선속에 대하여 수선하 체적을 일정하게 유지하면서 흘수형상 뿐만 아니라 좀더 근원적인 방형계수와 주요치수를 최적화시킴에 따라 저항특성이 어떻게 변화하는지에 대하여 조사하여 보고자 한다.

Table 3 Results of the optimization of main hull form characteristics according to ship speed

- Constant underwater volume(0.910 m³)

Main Hull Form Characteristics	Basic Hull Form (SHF)	Waterline-Optimized Hull Form			Overall-Optimized Hull Form		
		WHF-1	WHF-2	WHF-3	OHF-1	OHF-2	OHF-3
L _{PP} (m)	8.0	8.0			5.839	7.269	13.737
B (m)	0.8	0.8			1.168	0.969	0.611
T (m)	0.32	0.32			0.334	0.323	0.244
L/B	10.0	10.0			5.0	7.5	22.5
B/T	2.5	2.5			3.5	3.0	2.5
C _B	4/9	4/9			0.4	0.4	4/9
S (m ²)	7.130	7.186	7.116	7.080	6.205	6.828	9.297

앞에서 논의한대로 수선하 체적과 주요치수 및 선속이 주어졌을 때 최적흘수 형상을 구할 수 있으며 반대로 흘수형상이 결정되면 저항값도 추정할 수 있다. 따라서 주어진 수선하 체적과 선속에 대하여 체적이 일정하도록 방형계수와 주요치수에 관한 설계변수, 즉 길이/폭비, 폭/수심비를 체계적으로 변화시켜 가면서 그때마다 흘수형상을 최적화하고 저항을 계산하여 봄으로써 종합적인 최적화 작업, 즉 흘수형상 최적화와 주요특성 최적화 작업을 동시에 수행할 수 있다. 이때 주요특성 최적화 방법은 전체적으로 보아 수치방법이 된다.

종합적 최적화의 영향을 살펴보기 위하여 “흘수형상 최적화”시 프루드수 0.2, 0.3, 0.5에 해당하는 3가지 선속, 즉 선속 1.771 m/sec, 2.657 m/sec, 4.429 m/sec 각각에 대한 종합적 최적화를 수행하고 그 결과를 Table 3에 정리하여 놓았다. 따라서 Table 3은 위에 논의한 과정을 거쳐 최적화된 3가지 대상선의 주요특성을 보여주고 있다.

이어서 종합적 최적화 결과에 따른 선형을 설계하고 OHF(Overall-optimized Hull Form) Series라고 명명하였으며 동일 기본특성을 갖는 소형선 3척을 건조하였다. Fig. 14와 15는 각각 선속

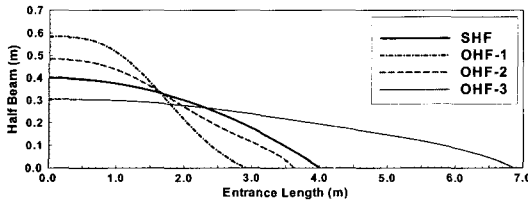


Fig. 14 Comparison of design load waterline shape between SHF and 3 OHFs



Fig. 15 Three overall-optimized hull form ships (OHF-1, OHF-2 and OHF-3)

1.771 m/sec, 2.657 m/sec, 4.429 m/sec에서 종합적으로 최적화된 3가지 대상선, 즉 OHF-1, OHF-2, OHF-3의 최적화된 설계흘수선 형상과 소형선을 보여주고 있다. OHF-1선과 OHF-2선은 Table 3에 정리되어 있는 기본특성과 동일한 특성을 갖고 있으나 OHF-3 선형은 길이가 13.737 m가 되어 이 선형에 대해서만 크기를 반으로 줄인, 즉 축척이 1/2인 모형선을 제작하였다.

이 시점에서 혼란을 피하고 연관된 결과를 분명히 표시하기 위하여 단순선형과 최적화된 선형들에 대한 선형기호(Hull Form Symbol)의 정의를 다시 한번 분명히 정리할 필요가 있다고 생각되며 Table 4에 각종 선형기호에 대한 정의를 정리하여 놓았다.

Fig. 16과 17은 제 3 대상선에 대하여 최적화 방안 에 따른 저항특성의 변화를 종합적으로 일목요연하게 보여주고 있으며 최적화 결과가 매우 극적으로 나타나고 있다.

세 가지 대상선 모두에 대하여 최적점에서의 저항특성 변화를 동시에 종합적으로 살펴보기 위하여 Table 5를 준비하였다. Table 5는 이론적, 시

Table 4 Definition of hull form symbols

Speed of Opt. (m/sec)	Basic Hull Form (Simple Math. Hull Form)		Waterline-Optimized Hull Form		Overall-Optimized Hull Form	
	F _N	Symbol	F _N	Symbol	F _N	Symbol
1.771	0.2	SHF	0.2	WHF-1	0.234	OHF-1
2.657	0.3		0.3	WHF-2	0.315	OHF-2
4.429	0.5		0.5	WHF-3	0.382	OHF-3

형적 연구결과와 총정리라고 할 수 있다.

오늘날 모형선의 저항을 실선의 저항으로 변환(extrapolation)하기 위해서는 잉여저항방법이나 형상계수방법의 두가지 중 한가지를 사용하여야 하는데 본 연구에서는 연구의 일관성을 위하여 OHF-3선의 모형시험 결과를 실선저항으로 변환하는데 있어서 다음과 같이 잉여저항방법을 사용하였다.

$$\text{모형선의 저항계수 : } C_{TM} = C_{FM} + C_R$$

$$\text{실선의 저항계수 : } C_{TS} = C_{FS} + C_R$$

그리고 상선에 대한 모형시험의 경우 일반적으로 축척이 1/40 정도 되는데 본 연구의 경우에는 1/2 이기 때문에 축척효과(scale effect)는 미소하리라고 생각한다. 또한 본 연구는 저항특성의 정량적 추정방법 보다는 저항특성을 될수록 크게 향상시킬 수 있는 선형설계 방법이나 방향설정에 목적이 있으므로 축척효과에 대해서는 더 이상 논의하지 않으려 한다.

Table 5에서 이론적 계산결과와 시험결과와의 차이는 주로 시험시 발생하는 트림에 기인하며 그 외의 부차적인 원인으로 선형이론(linearized theory)의 사용 및 모형시험의 오차를 들 수 있다.

7. 논의 및 결론

이미 언급한 바와 같이 본 연구과제는 고속세장선의 연료경제선형 설계방법을 확립하기 위한 사전 연구, 즉 기초연구로 수행되었으며 선박의 기하학적 형상, 즉 선형과 저항특성과의 관계 및 주요선형특성의 최적화에 대하여 살펴보았다. 연구항목마다 연구내용 및 결과를 논의한 바 있으므로

Table 5 Improvements in resistance characteristics according to the optimization of main hull form characteristics

- Constant underwater volume(0.910 m³)

V _s (m/sec)	Froude Number			Total Resistance(R _T , N)						Comparison of Resistance* (Resistance Reduction Ratio, %)					
	SHF	WHF Series	OHF Series	SHF		WHF Series		OHF Series		SHF and WHF Series		SHF and OHF Series		WHF Series and OHF Series	
				Theory	Test	Theory	Test	Theory	Test	Theory	Test	Theory	Test	Theory	Test
1.771	0.200	0.200	0.234	42.07	37.32	37.50	35.59	32.49	36.77	-10.86	-4.62	-22.77	-1.46	-13.36	+3.31
2.657	0.300	0.300	0.315	109.86	102.54	101.44	104.94	78.81	85.76	-7.66	+2.34	-28.26	-16.36	-22.31	-18.27
4.429	0.500	0.500	0.382	385.70	388.65	361.36	360.75	231.22	258.71	-6.31	-7.18	-40.05	-33.43	-36.01	-28.28

* - : Decrease, + : Increase

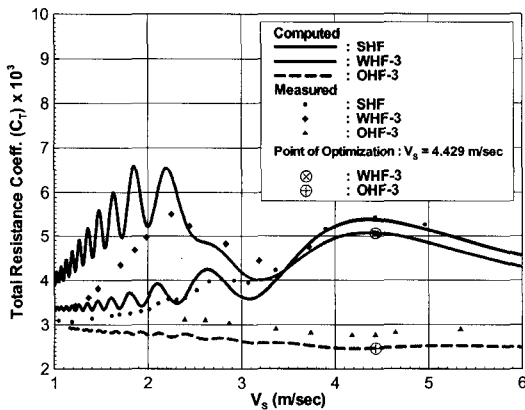


Fig. 16 Comparison of C_T between SHF and the 3rd optimized hull forms(WHF-3 & OHF-3)

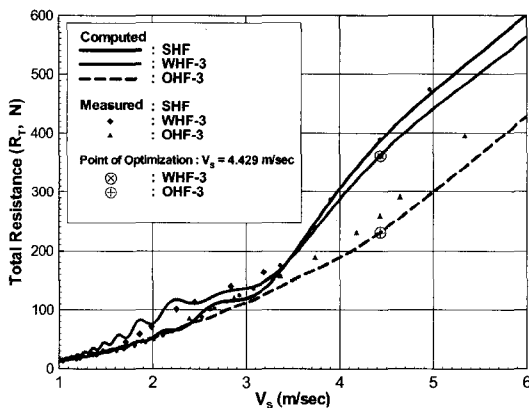


Fig. 17 Comparison of R_T between SHF and the 3rd optimized hull forms(WHF-3 & OHF-3)

여기서는 연구결과에 대한 결론을 다음과 같이 요약 정리하고자 한다.

- 본 연구에서 사용한 저항추정 방법은 전체적으로 보아 정량적으로는 실용성이 부족하나 정성적 경향은 비교적 만족스럽다고 할 수 있다. 따라서 고속세장선의 선형설계시 유용하게 활용될 수 있다.

- 길이/폭비가 7.5이상 되고 중속영역 이상에서 운항하는 세장선에 대해서는 저항특성의 정성적 경향 파악을 위해서는 물론, 정량적 추정을 위해서도 유용한 참고자료로 활용할 수 있다.

- 흘수형상을 나타내는 수식의 영향은 그리 간단하지가 않다. 흘수형상을 다항식으로 나타낼 때 최적 다항식을 찾자 실로 엄청난 양의 계산(116,500가지 조합에 대한 계산)을 하고 면밀히 분석하여 보았으나 뚜렷한 결론을 내릴 수 없었다. 그러나 일반적으로 프루드수가 낮으면 항이 적은 다항식이 좋고 프루드수가 높으면 항이 많은 다항식이 좋다.

- 흘수형상 최적화는 확실히 현저한 효과가 있다. 흘수형상 최적화 선형은 그렇지 않은 선형에 비하여 파의 발생자체가 적고 또한 선수파와 선미파가 호의적으로 간섭함으로써 저항이 크게 감소한다.

- 저항특성을 현저히 향상시키기 위해서는 흘수형상보다도 방형계수 및 주요치수와 같은 주요 선형특성의 최적화가 더욱 중요하며 나아가서는

주요선형특성과 출수형상을 동시에 종합적으로 최적화하여야 한다는 결론을 내릴 수 있다. 주요선형특성은 동일하게 유지하면서 출수형상만 최적화하였을 경우 저항 감소율은 약 10%선에 불과하나 주요선형특성과 출수형상을 동시에 최적화하였을 때 저항 감소율은 선속에 따라 40% 이상이 된다.

본 연구과제는 주요선형특성과 저항특성과의 관계에 대한 심도 있는 종합적 기초연구로서 방대한 양의 연구결과와 유용한 자료가 도출되었으며 성공적으로 수행완료 되었다. 본 연구를 통하여 도출된 연구결과는 실제 선형설계에 적극적으로 활용되고 있다. 그러나 고속세장선의 최적선형설계 방법을 확립하기 위해서는 본 연구에서 수행한 항목 외에도 몇 가지 기초연구를 더 수행해야 한다. 예를 들면 단면형상의 영향이라든지, 비선형의 영향(non-linear effect)을 들 수 있으며 이에 대한 연구도 이미 완료하였거나 수행 중에 있다. 이러한 연구결과에 대해서도 계속해서 결과를 발표할 예정이다.

참 고 문 헌

- 민계식, 김근제, 1984, “최소저항이론에 입각한 최적선형개발에 관한 연구”, 대한조선학회 논문집, 제 21권, 제 4호, pp. 21-28.
- Min, K.S. and Kang, S.H., 1998, “Systematic Study on the Hull Form Design and Resistance Prediction of Displacement-Type Super-High-Speed Ships,” J. of Marine Science and Technology, SNAJ, Vol. 3, No. 2, pp. 63-75.
- Wehausen, J.V., 1962 Unpublished Lecture Notes on Ship Hydrodynamics, University of California, Berkeley.



< 민 계 식 >



< 이 연 승 >



< 강 선 형 >



< 한 범 우 >