

## 최적선형개발에 대한 기초연구

서광철\*, 최희종\*, 전호환\*, 김문찬\*

\*부산대학교 조선해양공학과

# Fundamental Study for the Development of an Optimum Hull Form

KWANG-CHEOL SEO\*, HEE-JONG CHOI\*, HO-HWAN CHUN\* AND MOON-CHAN KIM\*

\* Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University

**KEY WORDS:** Optimum Hull Form(최적선형), Minimum Resistance(최소저항), Panel Method (패널법), Sequential Quadratic Programming(순차이차계획법), Wigley Hull(Wigley 선형)

**ABSTRACT:** Fundamental Study for optimizing ship hull form using SQP(sequential quadratic programming) method in a resistance point of view is presented. The Wigley hull is used as an initial hull and numerical calculations are carried out according to various froude numbers. To obtain the ship resistance the wave resistance is evaluated by a Rankine source panel method with nonlinear free surface conditions and the ITTC 1957 friction line is used to predict the frictional resistance coefficient. The geometry of a hull surface is represented and modified by B-spline surface patch. The displacement and the waterplane transverse 2nd moment of inertia of the hull is fixed during the optimization process. And the ship design program called EzHULL is used to draw the lines of the optimized hull form to perform the model test.

### 1. 서 론

최소저항의 관점에서 최적선형을 찾고자 하는 선형 최적화에 대한 연구는 적절한 목적함수의 선택, 최적화기법, 선체 표면의 기하학적인 표현, 설계변수와 제약조건의 선택, 사용된 CFD기법의 유용성과 신뢰성, 그리고 최적화를 수행하고자 하는 선박의 설계속도 등 많은 변수들에 의해 지배를 받으며, 주어진 선형에서 원하는 최적선형을 찾고자 할 경우 이와 같은 종속변수의 올바른 선정은 매우 신중하게 고려되어야 할 요소이다.

최소저항 최적선형 생성에 있어서 목적함수인 선체저항은 크게 조파저항과 점성저항으로 나눌 수 있다. 점성저항의 경우, 저항성능 이외에 선형이 만족하여야 하는 요구조건들로 인하여 그 값을 크게 줄이기는 어려운 반면, 요구조건을 충족하면서도 최소에너지를 가지는 파계를 생성하는 선형을 개발할 수 있다는 것은 많은 실험과 관찰에서 알려져 있다. 정수 중을 일정속도로 항해하는 선박에 의하여 생성되는 파계는 선박의 형상 특히 단면적 곡선, 수선면과 횡단면의 형상 등에 많은 영향을 받는다.

최근 컴퓨터 기술의 기하학적인 발전과 더불어 선박유체역학 및 선박설계를 연구하는 많은 조선공학자들에 의하여 광범위하게 연구되고 있으며, Janson/Larsson(1996)은 Series 60 선형에 대한 선형의 최적화를 수행하였는데, 선수부분의 유동은 포텐셜 유동으로 가정하고, 선미부분의 유동은 점성유동으로 가정하여 목적함수인 저항을 구하고, 배수량을 제한조건으로

하여 최적화 계산을 수행하고 그 결과를 발표하였고, Hino 등(1998), Tahara 등(1998)은 최적화기법 중 비선형계획법인 SQP(sequential quadratic programming)과 유동해석기법인 RaNS(Reynolds-averaged Navier Stokes)을 이용하여 실선에 대한 최적화를 수행하여 전체저항이 감소하는 선형을 제시한 바 있다. 그리고 Daniele 등(2001)은 최적화기법 중 직접탐색법인 SD(steepest descent), CG(conjugate gradient), SQP을 이용하여 유조선의 선수부 벌브 근처에 대하여 선체의 형상을 변화시켜가면서 최적화를 수행하고 그에 대한 결과를 발표한 바 있다. Day/Doctors(1997)는 최적화 기법으로 생물 진화의 원리로부터 착상된 GA(genetic algorithm)법을 사용하고, 목적함수인 전저항 중에서 조파저항성분을 구하기 위하여 Michell의 박선이론(thin ship theory)을 사용하였고, 마찰저항은 ITTC 1957년 공식을 사용하여 목적함수를 구하여 선박최적화를 수행하고 그 결과를 발표하였다.

본 연구의 목적은 최소저항을 가지는 최적선형개발을 위한 기초연구로서 본 연구를 위하여 개발된 선형 최적화 프로그램을 수학적선형인 Wigley선형에 적용하여 초기선형의 최적선형으로의 진화과정을 다른 진행속도들에 대하여 비교 검토하고자 하는 것이다. 본 연구에서 사용한 최적화 기법은 그 수렴속도와 유용성이 입증된 비선형계획법인 SQP법을 사용하였고, 목적함수인 전저항 중 조파저항성분을 구하기 위하여 자유수면의 비선형성을 고려한 비선형 랜킨소오스 패널법을 사용하여 유동계산 시 선체의 침하(sinkage) 및 트림(trim)을 고려한 선체주위의 유동계산을 수행하였으며, 마찰저항성분은 ITTC

1957년 공식을 사용하여 구하였다. 선체표면의 표현과 변경은 B-spline곡면 패치를 사용하여 나타내었다.

이 같은 방법을 사용하여 서로 다른 선체의 진행속도에 대하여 선형 최적화 계산을 수행하였고, 그에 대한 비교를 함으로써 선속의 변화에 따른 설계변수의 설정 방법이나, 또는 제약조건 선택에 대한 정보를 도출하고자 하였다.

본 연구에서 사용한 최적화 기법을 이용하여 생성된 최적 선형의 선형수조시험을 위한 모형선을 제작하기 위하여 선형 설계 프로그램인 EzHULL을 이용하여 선체의 곡면을 랜더링 하였고, 선도를 제작하여 선형수조시험을 위한 모형선의 제작 이나, 실선의 제작에 바로 적용할 수 있게 하였다.

## 2. 최적화 알고리즘

### 최적화 문제

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(x) && (1) \\ & \text{subjected to} && g_j(x) = 0, && j=1, \dots, m_e \\ & && g_j(x) \geq 0, && j= m_e+1, \dots, m \\ & && x_j \leq x \leq x_u \end{aligned}$$

$x$  는 설계변수,  $f$  는 목적함수 그리고,  $g$  는 제약조건을 나타내며,  $x_l$  과  $x_u$  는 각각 설계변수의 상한과 하한을 나타낸다. 그리고  $m$  는 제약조건의 수를 나타내고,  $m_e$  는 제약조건 중 등식 제약조건의 수를 나타낸다.

식(1)에서 함수  $f$  와  $g$  는 설계변수  $x$  에 대한 비선형 함수이므로, 최적화 문제를 풀기 위해서는 비선형 계획 알고리즘이 도입되어야 하며, 본 연구에서는 SQP법을 채택하였다.

비선형 최적화 기법의 하나인 SQP법은 비선형의 목적함수와 제약조건을 설계변수에 대해서 Taylor전개하고, 목적함수는 이차식으로 제약조건은 일차식 선형으로 근사하여 근사 부문을 얻는다(Vanderplaats 1984). 그 결과로 목적함수를 감소시키는 방향이 구해지면 이동거리를 결정하여 근사의 최적해를 주는 설계변수를 구한다. 이것을 다음 단계의 설계점으로 하여 반복 적용함으로써 최종적으로 최적해를 얻는 방법이다.

### 비선형 계획 알고리즘

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \frac{1}{2} d^T B d + \nabla f(x)^T d && (2) \\ & \text{subjected to} && \nabla g_j(x)^T d + g_j(x) = 0, \\ & && j = 1, \dots, m_e \\ & && \nabla g_j(x)^T d + g_j(x) \geq 0, \\ & && j = m_e+1, \dots, m \end{aligned}$$

위의 식에서  $B$  는 라그랑지(Lagrange)의 헤세행렬(Hessian matrix)을 나타내고,  $d$  는 탐색방향을 나타낸다.

## 3. 목적함수의 계산

목적함수(objective function)인 저항은 조파저항성분과 마찰저항성분으로 분리하여 구하였다.

### 조파저항의 계산

비점성, 포텐셜 유동의 가정으로 랜킨소오스 패널법에 의해 선체표면에서의 속도성분을 구하고, 베르누이의 정리를 이용하여 압력계수( $C_p$ )를 구한 다음, 선체표면에 걸쳐서 압력계수를 적분하여 선체에 미치는 조파저항을 계산하였다.

$$C_w = - \frac{\int_S C_p n_x ds}{S} \quad (3)$$

위의 식에서  $S$  는 침수표면적을 나타내고,  $n_x$  는 선체표면에서의 법선벡터의  $x$  방향의 성분을 나타낸다. 자유수면 경계조건식은 비선형 자유수면 경계조건식을 사용하였다(Raven 1996, 최희종등 2001).

### 마찰저항의 계산

마찰저항계수는 IITC 1957년 모형선-실선 상관곡선을 이용하여 구하였다.

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (4)$$

위의 식에서  $Rn$ 은 레이놀즈 수(Reynold's number)를 나타낸다.

### 전저항의 계산

전저항은 선체주위의 유동이 박리가 발생하지 않는다는 가정 하에 Hughes의 3차원 법을 이용하여 구하였다.

$$R_T = 0.5 \rho U^2 S [C_w + C_f(1+k)] \quad (5)$$

위의 식에서  $\rho$  는 물의 밀도,  $U$  는 선체의 진행속도, 그리고  $(1+k)$  는 형상계수(form factor)를 나타낸다. 형상계수를 구하기 위하여 Holtrop (1984)이 발표한 식을 사용하였다.

## 4. 선체의 변형

변화된 선형에 대한 저항추정을 위하여 유동 수치해석을 위한 계산 격자계를 생성하여야 하며, 생성된 선체형상은 특별한 제약이 없다면 불연속점이나 불연속선이 없이 선체 전반에 걸쳐 부드러워야 한다. 보통 선형 최적화 문제에서는 격자계 생

성과 관련된 인자를 설계변수로 사용하게 되는데, 이 경우 설계변수의 증가는 계산시간의 기하급수적 증가를 나타내므로, 가능하면 적은 수의 설계변수를 사용하는 것이 좋다. 그러나 너무 적은 설계변수를 사용하면 실제 원하는 선형을 얻지 못할 수도 있으므로 이에 대한 주의가 필요하다.

본 연구에서 채택한 계산 격자생성을 위한 선형의 곡면은 B-spline을 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$R(u, v) = \sum_{j=1}^{N_u} \sum_{i=1}^{N_v} c_{i,j} B_i^3(u) B_j^3(v) \quad (6)$$

위의 식에서  $B_i^3(u)$ 와  $B_j^3(v)$ 는 3차의 기저함수를 나타내고, 계수  $c_{i,j}$ 는 B-spline 꼭지점(control vertices)이며,  $N_u$ 와  $N_v$ 는 각각  $u$ 와  $v$  방향의 B-spline 꼭지점의 개수이다.

본 연구에서는  $c_{i,j}$ 를 설계변수로 두고 최적계산을 수행하였다.  $c_{i,j}$ 의 초기값은 주어진 기준선형에 대하여 B-spline surface fitting을 하여 구하였다.

## 5. 수치계산결과 및 고찰

본 연구에서는 Wigley 선형에 대하여 최적화계산을 수행하였다.

### 초기선형의 선정

본 연구에서 초기선형으로 수학선형인 Wigley선형을 사용하였다.

$$\begin{aligned} y &= (1 - 4x^2)(1 - 256z^2)/20 & \text{at } z \leq 0 \\ y &= (1 - 4x^2)/20 & \text{at } z > 0 \end{aligned} \quad (7)$$

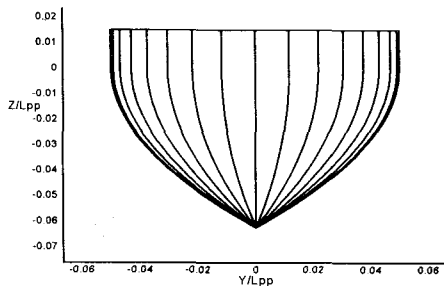


Fig. 1 Lines for the Wigley hull

비선형 계산 시 파형을 고려하여 선체표면의 격자계를 생성하기 때문에 교란되지 않은 자유수면 위의 부분에 대한 선체형상을 정의하여야 한다. 본 연구에서는 교란되지 않은 자유수면 위의 부분에 대한 선체표면의 정의를 하기 위하여  $z=0$ 에서의 선체 정의 식을 그대로 확장하여 사용하였다.

### 설계변수의 선정

Wigley선형에 대한 설계변수는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 선체의 표면을 B-spline surface fitting을 하여 선형변경을 위한  $5 \times 9$ 의 꼭지점망(control vertices network)을 생성하고 이를 설계변수로 두었다. Fig. 2에서  $\diamond$   $x$ 방향으로만 변화하는 꼭지점을 나타내고,  $\square$ 는  $y$ 방향으로만 변화하는 꼭지점을 나타내었으며,  $\bullet$ 는  $x$ 와  $y$ 방향,  $\blacklozenge$ 는  $x$ 와  $z$ 방향으로의 변화하는 꼭지점을 나타낸다. 그리고  $\blacksquare$ 는 모든 방향으로의 변화를 허용하였으며,  $\circ$ 는 주변 꼭지점들의 변화에 따라 이동하게 하였다.

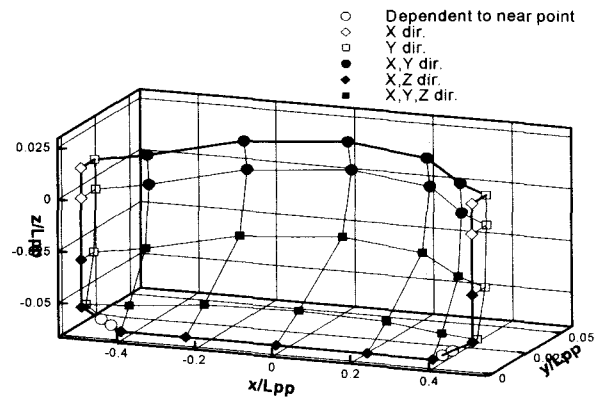


Fig. 2 Design variables for Wigley hull

각 설계변수가 이동할 수 있는 허용 상한과 하한은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -0.700 < x/Lpp < 0.700 \\ 0.000 < y/Lpp < 0.080 \\ -0.080 < z/Lpp < -0.010 \end{aligned} \quad (8)$$

### 제약조건의 설정

최소저항을 가지는 최적선형을 구하기 위한 최적화과정 중에 만족하여야 할 제한조건으로 최적화된 선형의 배수량과  $x$ 축에 관한 2차 관성모우멘트(2nd moment of inertia)가 초기선형의 값과 같아야 한다는 등식 제약조건을 부과하였다. 그리고 최적화과정 중에 선형표면형상이 안쪽으로 굽어지는 것을 방지하기 위하여 선체표면에 대한 법선벡터의  $y$ 성분은 0보다 커야한다는 부등식 제약조건을 부과하였으며, 그에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$n_y \geq 0 \quad (9)$$

Fig. 3은 식(9)에 대한 도식화를 한 것이다.

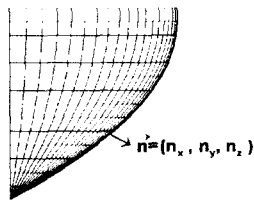


Fig. 3 Constraint condition

수치해석

본 연구에서는 초기선형인 Wigley선형의 선속 변화에 따른 최적선형의 진화양상을 보기 위하여 서로 다른 선속에 대한 계산을 수행하였다. 수치계산에 사용한 선속과 관련된  $Fn$ 은 0.250, 0.316 및 0.408이며, 그에 대한 수치해석 결과는 다음과 같다.

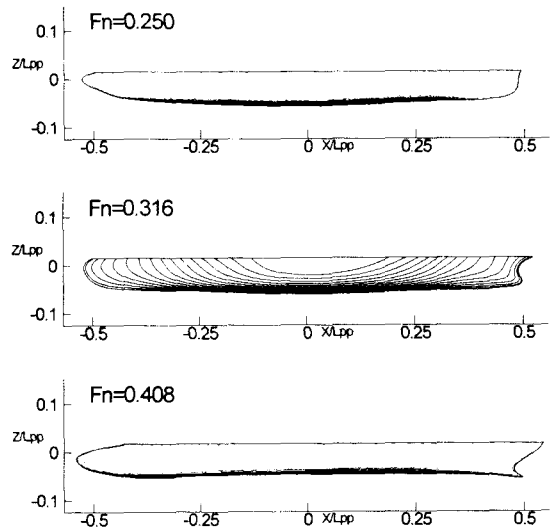


Fig. 5 Profile for the optimized hull

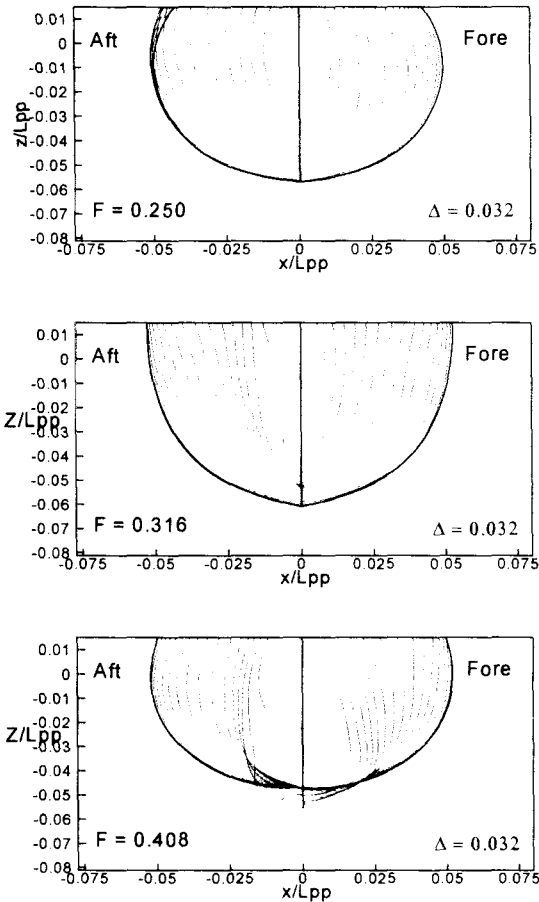


Fig. 4 Body plan for the optimized hull

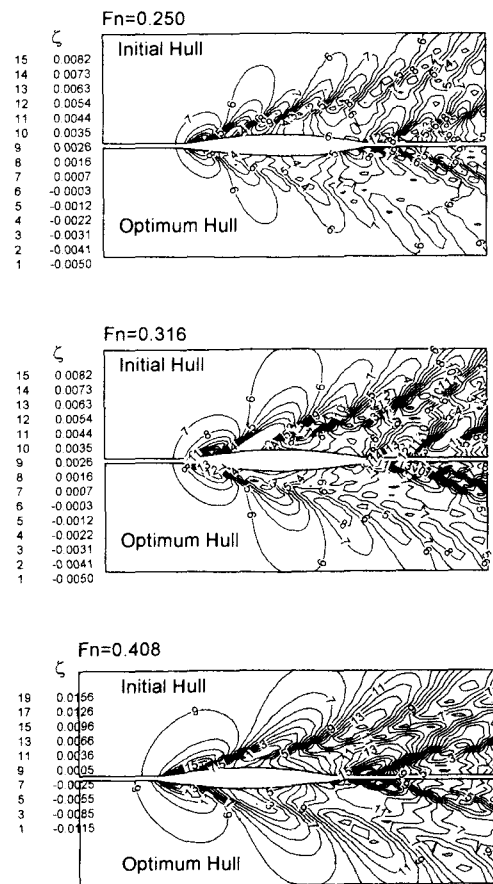


Fig. 6 Comparison of the wave pattern

Fig. 4와 Fig.5는 서로 다른 속도에서 최적화 되어진 선박의 정면도(body plan)과 측면도(profile)을 보여주고 있다. 저속에서 고

속으로 가면서 선수부의 선체형상의 진화를 살펴보면 아래가 비  
대해지는 것을 볼 수 있으며, 선미부는 선미 벌브가 발달하는 방  
향으로 진화해 가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 서로 다른 속도에서 최적화 되어진 선박과 초기선형  
에 의한 파형을 서로 비교한 것이다. 초기선형과 비교하여 어깨  
(shoulder)에서 발생한 파가 최적선형에서 벌브의 영향으로 파고  
가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 각각의 속도에서 초기선형과 최적선형의 선측파형  
을 서로 비교한 것이다. 각각의 속도에서 벌브의 발생으로 초  
기선형과 비교하여 최적선형에서 파가 다소 빨리 발생하는 것  
을 볼 수 있으나, 초기선형의 어깨에서 발생하는 파는 최적선  
형에서 벌브 발생으로 인해 초기선형과 비교하여 파고가 감소  
하는 것을 볼 수 있다. 또한, 선미 벌브 발생의 영향으로 선미  
에서도 파가 감소하는 것을 볼 수 있다.

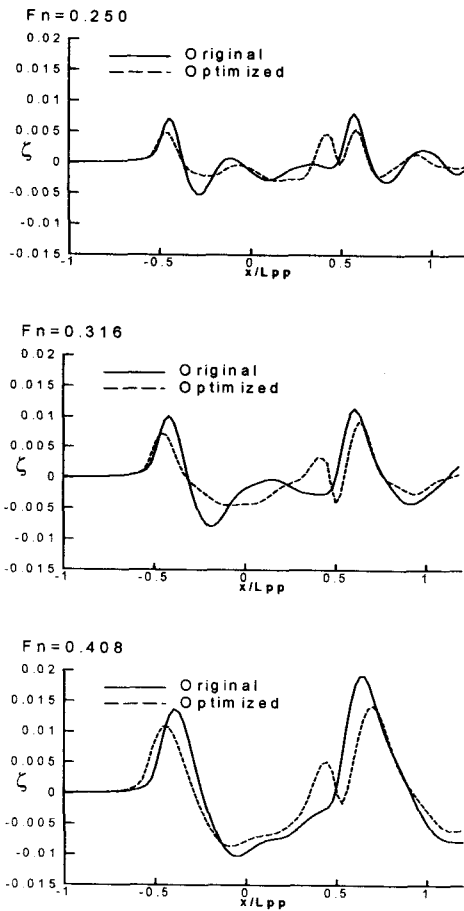


Fig. 7 Comparison of wave profile along the hull

Table. 1~3은 초기 및 최적선형의 유체정역학적 특성치인 배  
수량과 침수표면적, 그리고 유체동역학적 특성치인 조파저항, 전  
저항 및 선체의 침하(sinkage)와 트림(trim)을 비교한 것이다. 본  
연구에서는 배수량이 초기선형과 같아야 한다는 조건을 두었으  
나, 2%~4%정도 변화한 것을 볼 수 있다. 이것은 본 연구에서  
사용한 목적함수인 전저항을 최소로 하는 과정 중에 비현실적인

현상이면서 포텐셜 유동에서 벗어난 유동현상을 가지는 선형으로  
진화되어 가는 것에 대한 결과로서 본 연구에서는 음의 조파저항  
을 가지기 전의 결과를 최종 최적 결과로 취급하였다.

	Original	Optimum	$\Delta$ (%)
$\nabla$ (배수량)	0.002775	0.002863	2.74
$S_{wet}$	0.1419	0.1335	-5.91
$R_{WM}$	0.038	0.005	-86.84
$R_{TM}$	0.2726	0.225	-17.47
침하(Bow)	-0.001249	-0.000721	
침하(Stern)	-0.001204	-0.001759	

Table. 1 Comparison of hydrostatic data and resistance for  
Wigley hull (Fn=0.250)

	Original	Optimum	$\Delta$ (%)
$\nabla$ (배수량)	0.002775	0.002878	3.64
$S_{wet}$	0.1419	0.1401	-1.26
$R_{WM}$	0.1104	0.0231	-79.08
$R_{TM}$	0.4650	0.3734	-19.69
침하(Bow)	-0.002171	-0.001581	
침하(Stern)	-0.002179	-0.002495	

Table. 2 Comparison of hydrostatic data and resistance for  
Wigley hull (Fn=0.316)

	Original	Optimum	$\Delta$ (%)
$\nabla$ (배수량)	0.002775	0.002851	2.74
$S_{wet}$	0.1419	0.1432	0.91
$R_{WM}$	0.3000	0.09093	-69.69
$R_{TM}$	0.8593	0.6555	-23.71
침하(Bow)	0.000576	-0.004516	
침하(Stern)	-0.009699	-0.004531	

Table. 3 Comparison of hydrostatic data and resistance for  
Wigley hull (Fn=0.408)

전저항을 구하기 위하여 앞에서 언급한 바와 같이 Hughes의 3  
차원법을 사용하였으며, 전저항 계산에 필요한 Wigley선형에 대  
한 형상계수  $(1+k)$ 는 Holtrop의 공식에 근거하여 1.057로 두었  
다. 선체 배수량의 증가라는 불리한 조건에도 불구하고, 전저항은  
초기선형과 비교하여 많이 감소한 것을 볼 수 있다.

Fig.8은  $Fn=0.316$ 에 대한 최적선형에 대한 선형수조시험  
용 모형제작을 위한 선도(lines)를 선형설계프로그램인 EzHULL  
을 이용하여 제작한 것이다.

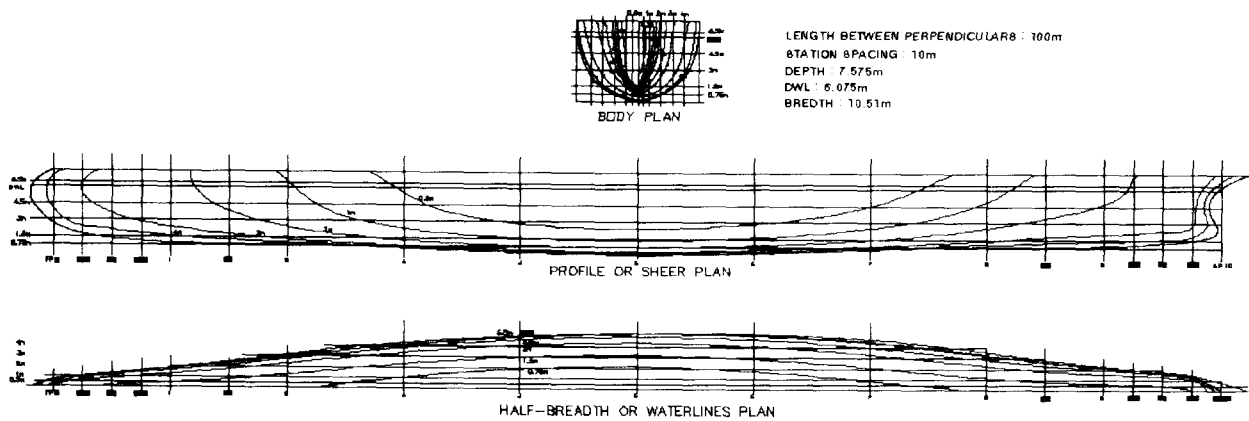


Fig. 8 Lines for the optimized Wigley hull( $F_n=0.316$ )

## 6. 결론

최소저항을 가지는 최적선형을 찾아내는 최적화 기법을 사용하여 수학선형인 Wigley선형의  $F_n$ 를 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였다. 선체에 미치는 저항을 목적함수로, 최적화기법으로 SQP법을 사용하였으며, 선체의 침하(sinkage) 및 트림(trim)을 고려하였다. 이와 같은 방법을 사용하여 수치계산을 수행하였으며, 수치해석결과 도출된 최적선형에 대한 모형실험을 수행하기 위하여 선형설계프로그램인 EzHULL을 이용하여 선도를 제작하였다. 그에 대한 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에서 제안된 최적선형은 배수량의 증가에도 불구하고, 전저항이나 조파저항이 줄어드는 것을 볼 수 있었다.
2. 선체의 속도가 증가하면서 선수부는 아래로 비대해지는 것을 볼 수 있었고, 선미부는 선미 벌브가 발달하는 것을 볼 수 있었다.
3. 본 연구 결과로 수학선형인 Wigley선형의 선속의 변화에 따른 최적선형에 대한 진화방향에 대하여 직관을 얻을 수 있었다.
4. 최적화된 선박의 모형시험을 위한 모형선의 제작이나, 실제 선박에 대한 적용을 위하여 선도를 제작하였다.
5. 본 연구의 결과로 제작된 선도를 이용하여 모형선을 제작하고, 모형시험을 통하여 타당성을 검증한 후, 실선에 대한 최적화 연구를 수행할 계획이다.

## 후 기

이 연구는 한국 과학재단의 첨단 조선공학 연구센터의 지원으로 수행되었다.

## 참 고 문 헌

최희중, 전호환, 하동대 (2001). "트랜섬 선미를 가지는 선형의 비선형 포텐셜 유동해석", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 195-198.

Vanderplaats, G.N. (1984). "Numerical Optimization Techniques for Engineering Designs", McGraw-Hill, New York.

Holtrop, I.J. (1984) "A Statistical Re-analysis of Resistance and Propulsion Data", International Ship-Building Progress, Vol. 31. pp.272~276.

Raven, H.C. (1996). "A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem", Doctor's Thesis, Delft Univ. Techn., Delft, Netherlands.

Janson, C., and Larsson, L. (1996). "A Method for the Optimization of Ship Hulls from Resistance Point of View", Proc. 21st Symp. Naval Hydrodynamics, pp. 680~696.

Day, A. H. and Doctors, L.J. (1997). "Resistance Optimization of Displacement Vessels on the Basis of Principal Parameters", Journal of Ship Research, Vol 41, No. 4, Dec. 1997, pp. 249-259.

Hino, T., Kodama, Y. and Hirata, N. (1998). "Hydrodynamic Shape Optimization of Ship Hull Forms Using CFD", Proceedings 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow And Hull Form Design, Osaka, Japan, May 25-27, pp. 533~541.

Tahara, Y., Himeno, Y. and Tsukahara, T. (1998). "An Application of Computational Fluid Dynamics to Tanker Hull Form Optimization Problem", Proceedings 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow And Hull Form Design, Osaka, Japan, May 25-27, pp. 515~531.

Daniele, P., Michele, R. and Emilio, F.C. (2001). "Design Optimization of Ship Hulls via CFD Techniques", Journal of Ship Research, Vol 45, No. 2, pp. 140~149.