

실험 계획법을 이용한 고속 반활주선의 부가물 최적화

서관희¹·김현철²†
에스엔에스이엔지(주) 시스템 엔지니어링¹
울산과학기술대학교 기계공학부²

A Study on the Appendages Optimization of a High Speed Semi-Planing Monohull using DOE

Kwanhee Seo¹·Hyuncheol Kim²†
System Engineering, SENSENG Co., Ltd¹
School of Mechanical Engineering Technology, Ulsan College²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The resistance of a high speed monohull can be dramatically increased at the high speed range due to the severe stern trim, spray formation and hull bottom pressure irregularity etc. In order to avoid these demerits associated with this resistance increase, various appendages such as the stern wedge, vertical wedge, stern flap, spray strip etc. have been studied. Each of appendage can control the trim angle and/or improve the resistance performance. If these appendages are combined for finding the maximal resistance reduction, there are enormous combination selections. This paper presents the DOE(Design of experiment) using an orthogonal array in order to decrease the model tests finding the optimum appendage combination. And we evaluate that the method introduced in this paper makes the optimal combination of appendages efficient and time-saving by applying to high speed semi-planing monohull. Here, the maximum speed and the least fuel expense are adopted as the decision criteria.

Keywords : Orthogonal array(직교 배열), High speed semi-planing monohull(고속 반활주선), Appendages(부가물), DOE(실험 계획법)

1. 서론

고속선은 선체 중량을 지지하는 방식에 따라 단동선, 다동선, 수중익선, 공기 부양선 및 위그선 등이 있으나 경제성, 보편성, 운용성 등의 장점으로 인해 단동선이 가장 많이 건조되고 있다(Lee, et al., 2010; Seo, et al., 2005). 단동선은 운용되는 속력 범위에 따라 배수량형 선형(displacement hull), 반활주형 선형(semi-planing hull)과 활주형 선형(planing hull)으로 구분할 수 있다. 이들은 각각 고유의 성능 특성을 가지고 있지만, 일반적으로 고속 운항 영역에서 과도한 선미트림, 선수에서의 물보라 발생 및 선저부의 압력 불균일에 기인한 속력 저하 등의 공통적인 특성을 보인다. 이를 개선하기 위해 선형개발과 함께 부가물에 대한 많은 연구가 지속적으로 수행되어 선미썰기(stern wedge), 수직썰기(vertical wedge), 물보라억제장치(spray strip), 선미판(stern flap), 핀 스케그(fin skeg) 등이 개발되었으며, 그 종류와 형상에 따라 항주스트림을 1~3°이상 개선시키고, 저항은 3~10% 정도 감소시키는 것으로 보고되고 있다(Seo, et al., 2005).

Karafiath and Fisher (1987)는 프리깃과 구축함에서의 선미썰기 크기가 미치는 저항과 트림 및 연료 소비량 감소에 대해 썰기 크기 별로 속장비(velocity-length ratio)에 따라 체계적으로 연구하였으며, Muller-Graf (1991)는 둥근 빌지(round bilge) 선체에 부착된 물보라억제장치의 위치에 따른 각종 성능변화에 대한 연구를 수행하였다. Seo, et al. (2005)는 60M급 반활주형 단동선형에 6종의 선미썰기와 2종의 물보라억제장치의 최적 조합에 대한 연구를 수행하였으며, Lee, et al. (2010)은 선미썰기와 물보라억제장치의 형상, 크기 및 설치 위치의 최적 설계를 수반한 반활주선의 선형 설계 과정을 소개하고 모형시험을 통해 검증하였다. Park, et al. (2011)은 워터젯 추진 고속선의 선수미부 부가물이 침로 안정성 개선에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

일반적으로 최적의 부가물 조합을 찾기 위해서는 모든 경우의 수를 실험하는 완전요인실험(full factorial test)이 적용되어야 하지만, 형상별/위치별/속력별로 수백가지의 실험을 동시에 수행해야 하는 완전요인실험은 모형시험 비용 과다 발생, 실험 일정 장기화 등으로 인해 현실적으로 어렵다.

따라서 순차적 결정 방법(step by step decision method)으로 실험 횟수 및 시간을 삭감하여 부가물의 형상과 위치를 결정하고 있다. 순차적 결정 방법은 부가물을 순차적으로 적용하면서 각 부가물의 최적 형상 및 위치를 결정하는 방법인데, 후속으로 부착되는 부가물로 인해 발생하는 트림 변화가 앞서 선정된 부가물 위치에서의 유선 유입 방향을 변경하여 오히려 속력성능에 불리한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 고속화될수록 이러한 현상은 더욱 심해진다.

Choi, et al. (2006)는 L8 직교배열에 의한 실험 계획법을 이용하여 심해 연약지반용 무한궤도차량의 우수한 궤도 설계인자를 도출하였으며, Park, et al. (2006)은 3수준계의 형상 파라미터를 설정하여 적의 위험인자를 잡음으로 하여 함정의 형상을 최적화하였다.

따라서 본 연구에서는 고속 반활주선에 설치되는 부가물들의 최적 조합을 찾기 위해 직교배열(orthogonal array)을 이용한 실험 계획법(DOE: Design of Experiment)을 적용하여, 속력성능 개선과 연료절감 측면에서 최적 부가물 조합을 도출하고 그 타당성을 고찰하였다. 그리고 시험오류(test error)를 최소화하면서 모형 시험 횟수와 비용을 획기적으로 줄일 수 있음을 확인하였다.

2. 부가물의 특성과 주효과 인자

2.1 설계선 및 부가물의 특성

본 연구의 설계선은 50M급 고속 반활주선이며, 주요 치수와 설계조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Characteristics of the design ship

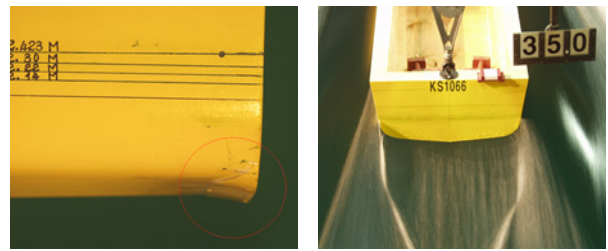
Item	Description	Unit	Design ship
L/B	Length/Breadth	-	6.73
B/d	Breadth/Design draft	-	3.28
d	Design draft	m	2.3
d _T	Test draft	m	2.22
C _b at d _T	Block coefficient	-	0.49
LCB	Longitudinal Center of Buoyancy	% (from AP)	-8.52
V _s	Design speed	knots	15(Cruise) ~ 35(Max)
Fn	Froude number	-	0.34(Cruise) ~ 0.80 (Max.)
Remarks	Semi-planing monohull with 4 waterjets builded in strip		

고속 반활주형 선형은 선속이 증가하게 되면 선미트림(stern trim)의 급격한 증가로 인한 항력이 발생하고, 큰 물보라(spray)에 기인한 선수부 저항이 크게 증가하는 문제점을 가지고 있다. 또

한, 주로 워터제트 방식의 추진방식이므로 높은 추진효율을 위해 선저 해수 유입구(inlet duct)에서의 흐름을 원만하게 해 주어야 한다. 이러한 고속 반활주 선형에 성능 개선을 위해 기 개발된 부가물들의 유체역학적 특성을 살펴보면 다음과 같다.

선미썰기(stern wedge)

선미썰기는 선미끝단(transom)에 부착되는 썰기모양의 부가물로서 고속 항주시 작용하는 양력과 압력 증가로 인해 선미끝단 부근의 출수를 낮게 하여 선미 트림을 개선하는 역할을 한다 (Fig. 1).



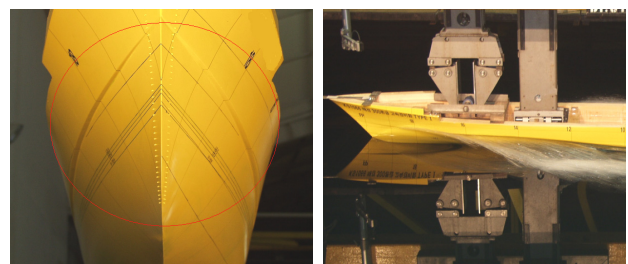
(a) Stern wedge (b) Wave pattern
Fig. 1 Shape and wave pattern of stern wedge

선미썰기의 길이와 선체와 이루는 각도에 따라 $0.5 < Fn < 0.9$ 에서 약 4 ~ 12%의 저항 감소 효과를 가져온다 (Karafiath & Fisher, 1987). 또한, 중형급 이상의 고속선에서는 선미부의 주위의 유동장을 좋게 하여 추진기 효율을 향상시킴으로써 약 14% 이상의 마력 절감 효과를 나타내기도 한다.

물보라억제장치(water spray strip)

물보라억제장치는 선수부 흡수위 현측에 부착되어 선수파와 물보라(water spray)를 억제하는 장치로서, 침수 표면적 감소와 양력으로 인해 저항 성능을 향상시키는 역할을 한다 (Fig. 2).

고속 반활주형 선형은 속력이 높아질수록 물보라에 의한 침수 표면적이 선체 전체의 침수표면적의 약 14 ~ 30%까지 차지하게 되는데, 물보라억제장치를 적절한 높이 설치함으로써 이러한 현상을 현저히 감소시킬 수 있다 (Gonzalez, 1989; Shiming & Yuncai, 1982). 또한, 물보라억제장치는 갑판 침수를 감소시키고, 횡풍시 물보라가 갑판위로 날리며 시야를 가리는 현상도 억제하는 역할도 한다.



(a) Spray strip (b) Wave pattern
Fig. 2 Shape and wave pattern of spray strip

핀 안정기(fin stabilizer)

핀 안정기는 선체에 설치된 핀의 양각을 제어하여 횡천시 발생하는 횡동요를 효과적으로 감소시키는 장치로서 승선원의 피로를 경감시키고 선박의 안정성을 유지하는 역할을 한다. 핀의 횡요 감쇠 성능은 선박의 속도가 증가할수록 효율이 증가하며, 고속선에서는 약 15 knots 이상에서 최대 효율을 가진다. 본 연구의 설계선은 10 knots에서 약 60%, 15 knots 이상에서는 약 80% 이상의 횡요 감쇠율을 가진다 (Kawazoe, et al., 1994).

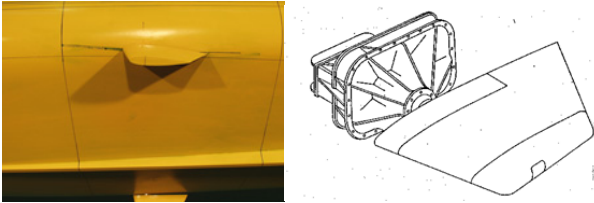


Fig. 3 Shape of fin stabilizer

핀 스케그(fin skeg)

핀 스케그는 선미 수선하부에 길이방향으로 부착되는 부가물로서, 항주시 선미트림을 개선하며 선미부의 입력증가에 기인한 선수방향으로의 추력을 발생시킨다. 특히, 워터제트 추진기의 경우 해수 유입구에서의 흐름을 원활하게 하므로 추진효율을 향상시키는 역할을 한다. 또한, 운항시 직진성능을 좋게하는 작은 스케그 (small skeg) 역할을 포함하며, 횡동요시 부가질량을 높여서 횡요 방지의 기능도 한다. 고속 경비정의 경우 선박길이 대비 6 ~ 10% 정도 스케그를 선미끝단에서 선수방향으로 선저에 설치한다.



Fig. 4 Shape of fin skeg

선미 스케그(stern skeg)

선미 스케그는 수선하에 선미부에 설치하여 선박의 직진 성능을 향상시키며, 선박의 횡동요시에 부가 질량력을 높여준다. 또한, 반목을 설치하는 곳으로 사용된다. 워터제트 추진기를 장치한 고속선의 경우 추진기의 해수 유입구 근처 유선 흐름에 변화를 주지 않고 조종성능이 확보되도록 가능한 해수유입구로부터 거리를 두어 설치한다. 선미 스케그는 선박 길이의 약 30% 내외로 하여 선박 중앙까지 길게 설치하며, 선미방향의 끝단은 날카롭게 마무리하여 와류의 영향을 최소화하도록 설계된다. 고속선

에서 선미 스케그로 인한 마찰저항 증가량은 전체 저항의 약 2 ~ 4%이며, 트림 변화에는 거의 영향을 주지 않는다.

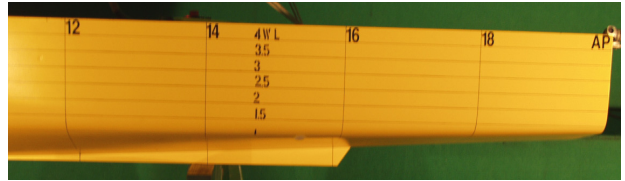


Fig. 5 Shape of stern skeg

2.2 부가물의 주효과 인자와 수준 선정

고속 활주선의 트림 변화를 최소화하면서 속도 성능을 개선할 수 있는 부가물들의 최적 조합을 찾기 위해 핀 안정기는 실험 특성치 요인에서 제외하고, 선미 스케그는 나선(barehull)에 포함되어 나선저항(barehull resistance)으로 분류하였다. 따라서 선미빼기, 물보라억제장치, 핀 스케그를 부가물의 주효과 인자(main effect factor)로 선정하고 각 설계기준에 따라 실험수준(test level)을 결정하였다. 이외에도 저항을 개선하기 위해 선미플랩 (stern flap), 덕테일(duck tail), 트립탭(trip tab) 등 다양한 연료 절감 장치(energy saving device)들이 개발되었지만, 부가물 특성의 중복성과 설계선 특성을 고려하여 제외하였다.

선정된 부가물들에 대한 주효과 수준은 다음과 같다. 선미빼기의 경우 주요 설계요소로는 길이, 각도, 폭, 면적 등이 있지만, 고속선에서는 길이와 각도가 속도 성능에 가장 큰 영향을 미친다 (Karafiath, et al., 1999). 일반적으로 선미빼기의 각도가 7°~13° 부근까지는 조파저항 값이 감소하며, 선미빼기의 길이는 전체 선박길이의 약 0.87%~1.79%까지는 길수록 고속에 유리하지만, 선미끝단 깊이가 증가하여 저속에서는 저항증가를 가져올 수 있다. Seo, et al. (2005)는 60M급 고속선에서 선미빼기의 길이가 전체 선박길이의 약 1.0% 근방에서 우수함을 확인하였다.

물보라억제장치의 주요 설계요소로는 길이, 각도, 폭, 선수높이, 선미높이 등이 있다. 폭은 선박의 수면폭(breadth at waterline)의 2.2%, 길이 방향 폭의 분포는 물보라의 높이를 고려하여 선미수선(AP)으로부터 3 Station에서 폭을 최대로 하여 점차로 감소시켜 선수 끝과 10 Station에서 0가 되도록 하였다. 설치 높이는 고속영역에서 과도한 양력을 받거나 물보라를 효과적으로 제어하지 못하여 저항으로 작용하지 않도록 50 ~ 60M 급 유사 실적선 (Seo, et al., 2005)을 참조하였다.

핀스케그의 주요 설계요소로는 길이, 높이, 폭, 각도 등이 있으며, 본 설계선의 경우, 폭은 400mm로 하고, 크기에 따른 수준을 길이와 높이로 정의하였다. 여기서 길이에 따른 제약조건으로 최소길이는 선미끝단에서 4,000mm이상, 최대길이는 5,700mm지점의 너클라인(knuckle line)까지의 길이가 설치 가능하며, 워터제트의 입구에서 벗어나지 않아야 한다.

Table 2은 결정한 부가물들에 대한 주효과 인자 수준을 나타낸다.

Table 2 Main effect factor's levels about appendages

Design variable		Unit	Level 1	Level 2
A	Angle of stern wedge	Degree	7	11
B	Attached height of water spray strip	$h_{FSR}/Draft$	0.5	0.4
		$h_{ASR}/Draft$	0.15	0.11
C	Size of fin skeg	Length	4,000	5,000
		Height	400	500
D	Length of stern wedge	mm	450	550
A×B Interaction				
A×C Interaction				
v_i	Ship speed	v_1	knots	15
		v_2		23
		v_3		30
		v_4		35

Remarks:

A₁D₁: Stern wedge I

A₁D₂: Stern wedge II

A₂D₁: Stern wedge III

A₂D₂: Stern wedge IV

B₁: Water spray strip I

B₂: Water spray strip II

C₁: Fin skeg I

C₂: Fin skeg II

h_{FSR} : Height above draft at the end of spray strip in the fore ship's direction

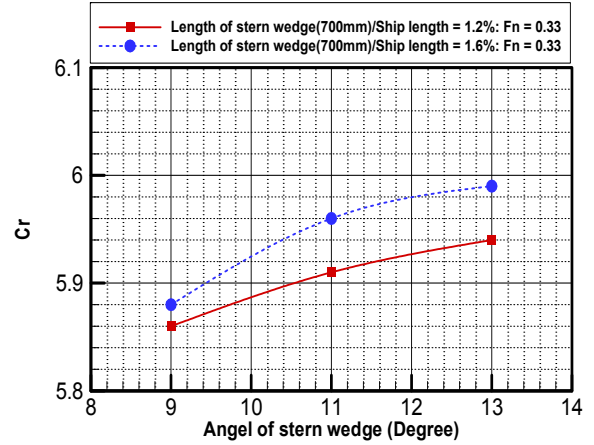
h_{ASR} : Height above draft at the end of spray strip in the aft ship's direction

2.3 부가물 주효과 인자의 교호작용

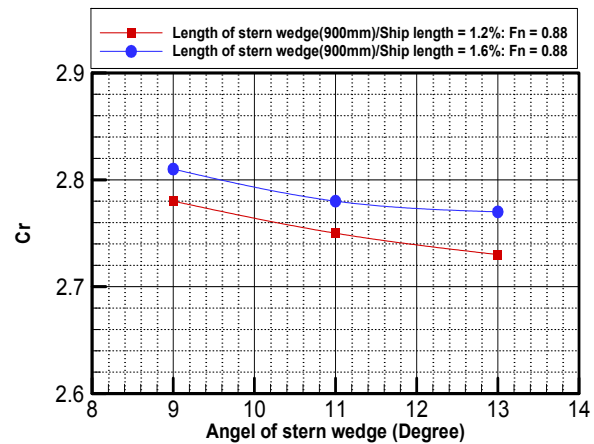
부가물들은 다양한 속력 범위에서 고유의 트림과 유동 특성에 영향을 미치므로 부가물 간에 발생할 수 있는 교호작용(interaction effect)을 미리 분석하거나 발생을 예측하여 실험계획에 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 부가물 주효과 인자의 교호작용 분석을 위해 유사선 부가물간의 완전요인 실험을 한 모형실험 결과가 있는 경우에는 교호작용을 검토하고, 부가물간의 완전요인 실험을 한 결과가 없는 경우에는 각 부가물 설치로 인해 트림 및 저항의 변화가 클 것으로 예상되는 것을 서로 조합하여 교호작용이 있는 것으로 가정하였다. 선미썰기의 각도와 길이에 대한 유사 실적선의 저항시험 결과 (Karafiath & Fisher, 1987)를 살펴보면 Fig. 6과 같다. 유사선의 완전요인 실험에 의한 잉여저항계수(Cr)의 변화를 살펴보면 항해속력(Fn=0.33)과 최대속력(Fn=0.88)에서 선미썰기 각도변화에 따른 Cr값이 비례하는 경향을 나타낸다. 따라서 각도와 길이에 대한 교호작용은 없음을 알 수 있다.

그러나 본 연구의 설계선은 선미썰기 각도의 수준 차이가 4도이며, 길이의 수준 차이가 100mm이므로 Fig. 6으로부터 각 수준 변화에 따른 트림 및 잉여저항계수(Cr)의 변화량을 추정하면 Table 3과 같다. 여기서 각도 변화에 의한 Cr값 및 트림 변화를

이 길이 변화에 의한 결과보다 크므로, 선미썰기와 다른 부가물과의 교호작용이 있는지를 판단할 때, 각도를 교호작용을 일으킬 수 있는 주요인자로 설정하는 것이 효과적이다.



(a)



(b)

Fig. 6 Interaction effect of the angle and length of stern wedge

Table 3 Deviation of Cr and trim according to the stern wedge's level

Item	Unit	Level's gap	
		Wedge angle: 4 Degree	Wedge length: 100 mm
Rate of change in Cr	%	1.4 ~ 1.9	0.2 ~ 0.7
Rate of change in trim	Degree	0.15 ~ 0.5	0.05 ~ 0.1

한편, 부가물의 순차적인 실험결과나 개별 부가물의 특성에 대한 연구는 많이 있지만, 부가물들의 상호완전요인실험에 대한 연구는 거의 찾아 볼 수 없다. 따라서 교호작용이 클 것으로 예상되는 선미썰기의 각도와 개별 부가물 실험을 통하여 트림과 저항 변

화에 영향을 주는 물보라억제장치 높이 그리고 핀 스케그의 크기를 서로 조합하여 교호작용 실험인자로 결정하였다 (Table 3).

3. 직교배열표를 이용한 실험계획법

3.1 직교배열을 위한 실험배치와 저항시험결과

Table 2와 같이 설계선의 실험인자와 수준으로 선정된 부가물 들은 주효과 인자의 수준을 A1 ~ D2로 할당하여 $L_8(2^7)$ 실험 배치표 (Clarke & Kempson, 1997; Koh, et al., 1998; Taguchi, 1986)에 따라 저항시험을 수행하였다. Table 4는 A1B1C1D1 ~ A2B2C2D2의 부가물들에 대한 각 속력에 해당하는 잉여저항계수 (C_r)를 나타낸다. 그리고 설계선은 워터제트 추진이므로 메이커 (maker)가 제공한 추진 효율을 적용하였다.

3.2 최소 연료비용을 위한 목적함수 도출

최소 연료비용을 위한 목적함수로서 연간 연료소모량은 식 (1) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_1(v_i) = BHP(v_i)f(v_i) \times \text{연간 기관 운용 시간} \times \text{연료소모율 (kg/ps} \cdot h) \quad (1)$$

여기서,

- $F_1(v_i)$: 선속 v_i 일 때의 연간 연료소모량 (kg/year)
- $f(v_i)$: 선속 v_i 으로 운항할 확률
- $BHP(v_i)$: 선속 v_i 일 때의 주기관 제동마력 (ps)

이때, 연간 기관운용시간, 연료소모율, 침수표면적, 해수밀도를 상수로 두면 식 (1)은 선속 v_i 에 대한 함수로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_1 F_1(v_i) = \frac{v_i^3 f(v_i) C_T(v_i)}{\eta_D(v_i)} \quad (2)$$

여기서,

- C_1 : 상수
- $C_T(v_i)$: 선속 v_i 에 따른 전 저항계수
- $\eta_D(v_i)$: 선속 v_i 에 따른 전달효율

식 (2)의 C_1 은 부가물 조합에 따라 변하지 않으므로 분산 분석에서 상쇄되어 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(v_i) = \frac{v_i^3 f(v_i) C_T(v_i)}{\eta_D(v_i)} \quad (3)$$

설계선의 추진체계는 4대의 디젤기관과 워터제트가 장착되며, 속력의 주운용은 2축 상태에서 순항속력(cruise speed) 55%, 최대속력(maximal speed) 15%로 계획하며, 4축 상태에서 적정속력 25%, 최대속력 5%로 계획하고 있다. 따라서 연료비용에 우수한 부가물 선정시의 목적함수는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_i &= F(v_1) + F(v_2) + F(v_3) + F(v_4) \\ &= 0.55 \frac{v_1^3 C_T(v_1)}{\eta_D(v_1)} + 0.15 \frac{v_2^3 C_T(v_2)}{\eta_D(v_2)} \\ &\quad + 0.25 \frac{v_3^3 C_T(v_3)}{\eta_D(v_3)} + 0.05 \frac{v_4^3 C_T(v_4)}{\eta_D(v_4)} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, v_1, v_2, v_3, v_4 각각 15, 23, 30, 35노트에서의 초당 속도(m/s)

3.3 연료비 절감에 우수한 최적 부가물 조합 선정

Table 4의 저항시험결과를 식(4)에 적용하면 부가물 조합에 따른 F 와 실험인자 수준별 F 합은 Table 5, 6과 같다. 여기서 각 실험인자에서 SN비(signal to noise ratio)의 전체 합을 T , 실험인자 수준별 F_i 의 합을 T_i , 각 수준별 F_i 를 y_{ij} 로 나타내고 각 인자의 l 수준과 반복수 r 을 적용하여 변동(S)을 계산하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 4 DOE and resistance test results

Test No.	Inner array							Outer array residual resistance coeff. $C_r (\times 10^{-3})$				Test case
	A	B	A×B	C	A×C	e	D	v_1	v_2	v_3	v_4	
1	1	1	1	1	1	1	1	6.078	5.961	3.920	3.014	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁
2	1	1	1	2	2	2	2	6.194	5.929	3.876	3.034	A ₁ B ₁ C ₂ D ₂
3	1	2	2	1	1	2	2	6.207	6.005	3.922	3.178	A ₁ B ₂ C ₁ D ₂
4	1	2	2	2	2	1	1	6.249	6.072	3.963	3.175	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁
5	2	1	2	1	2	1	2	6.283	5.976	3.912	2.846	A ₂ B ₁ C ₁ D ₂
6	2	1	2	2	1	2	1	6.510	6.136	3.952	3.109	A ₂ B ₁ C ₂ D ₁
7	2	2	1	1	2	2	1	6.210	5.944	3.896	3.090	A ₂ B ₂ C ₁ D ₁
8	2	2	1	2	1	1	2	6.383	5.977	3.875	3.203	A ₂ B ₂ C ₂ D ₂
Basic symbol	a	b	ab	c	ac	bc	d					Group
Group	1	2		3								

Table 5 F_i values according to the appendage combination

Appendage combination	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	A ₁ B ₁ C ₂ D ₂	A ₁ B ₂ C ₁ D ₂	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁
F_i	18.245	18.229	18.398	18.507
Appendage combination	A ₂ B ₁ C ₁ D ₂	A ₂ B ₁ C ₂ D ₁	A ₂ B ₂ C ₁ D ₁	A ₂ B ₂ C ₂ D ₂
F_i	18.263	18.614	18.296	18.410

Table 6 Sum of F_i values according to levels of test factor

Factor	A		B		A×B		C	
Level	1	2	1	2	1	2	1	2
Sum of F_i	73.38	73.58	73.35	73.61	73.18	73.78	73.20	73.76
Factor	A×C		e		D		T	
Level	1	2	1	2	1	2		
Sum of F_i	73.67	73.30	73.43	73.54	73.66	73.30	146.96	

e: 실험계획법의 오차항

$$CT = \frac{T^2}{8} \tag{5}$$

$$S_T = \sum_i \sum_j y_{ij}^2 - CT \tag{6}$$

$$S_A, S_B, S_{A \times B}, S_C, S_{A \times C} \text{ or } S_D = \sum_i \frac{T_i^2}{r} - CT \tag{7}$$

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D + S_{A \times B} + S_{A \times C}) \tag{8}$$

각 인자의 변동(S)중에서 오차항(e)에 비해 비교적 작은 값은 오차항에 포함시켰으며, 분산분석에 의한 결과는 Table 7과 같다.

Table 7 Variance analysis of fuel expense viewpoint

Test factor	S	∅	V	Fo	F(0.1)
B	0.0084	1	0.0084	2.5	8.53
AXB	0.0452	1	0.0452	13.3	8.53
C	0.0388	1	0.0388	11.5	8.53
AXC	0.0173	1	0.0173	5.1	8.53
D	0.0163	1	0.0163	4.8	8.53
e	0.0068	2	0.0034	1.0	
T	0.1328	7			

S: 변동, ∅: 자유도, V: 분산, Fo: 검증 통계량, F(0.1): F-분포 값(유의수준 10%)

Table 7에서 귀무가설인 $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ (σ : 표준편차, 부가물 실험인자의 각 수준 변화로 연료량에 차이가 없다.)을 판정하는 검정 통계량(F_0)이 유의수준 10% 이내에서 기각영역에 해당되는 인자는 A×B, C로 나타났다. 그러므로 교호작용 A×B와 주효과 인자 C는 목적함수 값에 영향을 크게 끼치고 있다. 이것은 선미썰기의 각도(A 인자)와 물보라억제장치 높이(B 인자)의 교호작용에 있어, 각 조합에 따라 연료 소비량이 차이가 나며 핀스케그(fin skeg)의 크기 또한 영향을 미침을 알 수 있다.

Table 8에서 교호작용의 최적 조합을 분석한 결과 A1B1이 최적조합으로 나타나, 선미썰기의 각도가 작은 7도와 물보라억제장치의 부착 위치가 높은 것이 연료소비량에 가장 유리한 것으로 분석된다.

Table 8 F_i -analysis of interaction A×B

Interaction	A ₁	A ₂
B1	36.475 (Average: 18.237)	36.878 (Average: 18.439)
B2	36.905 (Average: 18.452)	36.706 (Average: 18.353)

또한, Table 9는 주효과 인자의 수준별 F_i 의 평균을 분석한 결과이며, F_i 의 평균이 상대적으로 작은 값을 가지는 수준은 각각 A1, B1, C1, D2이다.

Table 9 F_i -average analysis of main effect factor

Level	A	B	C	D
1	18.345	18.338	18.301	18.415
2	18.396	18.403	18.440	18.325
Gap	0.051	0.065	0.1390	0.090

Table 8과 Table 9의 결과로부터 연료비 절감에 우수한 최종 부가물 조합으로 A1B1C1D2 즉, Stern wedge II, Water spray strip I, Fin skeg I으로 선정하였다.

3.4 최대 속력 성능에 우수한 최적 부가물 조합 선정

일반적으로 함정과 같은 고속선은 설계 조건으로 최대 속력이 적용된다. 따라서 설계선의 최대속력(35노트)에서 잉여저항계수가 최소가 되는 부가물 조합 선정을 위해 통계적 분석을 수행하였다(Table 10, 11). 이때 해석의 편리를 위해 잉여저항계수는 10^3 을 곱한 값을 사용하였다.

각 실험인자 수준별 Cr의 합을 T_i , 각 수준별 Cr값을 y_{ij} 로 나타내면 변동(S)의 계산은 식 (5)~(8)과 같다. 이때 각 인자의 변동(S)중에서 오차항(e)에 비해 비교적 작은 값은 오차항에 포함시켰다. 분산분석 결과는 Table 12와 같다.

Table 12에서 귀무가설인 $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ (부가물 실험요인의 각 수준 변화로 잉여저항 값의 차이가 없다.)을 판정하는 검정 통계량(F_0)이 유의수준 10% 이내에서 기각영역에 해당되는 인자는 B, C, A×C로 나타났다.

따라서 교호작용 A×C와 주효과 인자 B, C와의 수준 변화는 잉여저항에 큰 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 이것은 선미썰기의 각도(A 인자)와 핀스케그의 크기(C 인자)의 조합에 따라 최대 속도마력에 차이가 나며, 물보라억제장치의 높이, 핀스케그의 크기 인자 또한, 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Table 10 Cr according to the appendage combinations

Appendage Combination	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	A ₁ B ₁ C ₂ D ₂	A ₁ B ₂ C ₁ D ₂	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁
Cr	3.014	3.034	3.178	3.175
Appendage Combination	A ₂ B ₁ C ₁ D ₂	A ₂ B ₁ C ₂ D ₁	A ₂ B ₂ C ₁ D ₁	A ₂ B ₂ C ₂ D ₂
Cr	2.846	3.109	3.090	3.203

Table 11 Sum of Cr according to levels of test factor

Factor	A		B		A×B		C	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Level	1	2	1	2	1	2	1	2
Sum of Cr	12.40	12.25	12.00	12.65	12.34	12.28	12.13	12.52
Factor	A×C		e		D		T	
	1	2	1	2	1	2		
Level	1	2	1	2	1	2		
Sum of Cr	12.50	12.14	12.24	12.41	12.39	12.26	24.65	

Table 12 Variance analysis of maximum speed viewpoint

Test factor	S	ϕ	V	F ₀	F(0.1)
B	0.0518	1	0.0518	23.4	4.54
C	0.0195	1	0.0195	8.8	4.54
A×C	0.0162	1	0.0162	7.3	4.54
e	0.0088	4	0.0022	1.0	
T	0.0963	7			

Table 13에서 교호작용의 최적 조합을 분석한 결과, A2C1이 최적조합으로 나타나 선미썰기의 각도가 큰 11도와 핀스케그의 크기가 작은 것이 최대 속도에 유리한 것으로 나타났다.

Table 13 Cr-analysis of interaction A×C

Interaction	A ₁	A ₂
C ₁	6.192 (Average:3.096)	5.935 (Average:2.968)
C ₂	6.209 (Average:3.105)	6.313 (Average:3.156)

또한, 주효과 인자 수준별로 Cr의 평균을 분석한 결과, Table 14와 같이 Cr이 상대적으로 작은 값을 가지는 수준은 A2, B1, C1, D2으로 나타났다.

Table 14 Cr-average analysis of main effect factor

Level	A	B	C	D
1	3.100	3.001	3.032	3.097
2	3.062	3.162	3.130	3.065
Gap	0.038	0.161	0.099	0.032

Table 13과 Table 14의 결과로부터 최대 속도 성능에 우수한 최종 부가물 조합으로 A2B1C1D2 즉, Stern wedge IV, Water spray strip I, Fin skeg I으로 선정하였다.

4. 최적 부가물 조합 검증

5절에서 선정된 최종 부가물 조합의 성능 검증을 위해 모형시험을 수행하였다. 그런데 최대 속도 성능에 우수한 최종 부가물 조합인 A2B1C1D2의 경우에는 Table 4의 시험결과에 있으므로 연료 절감에 우수한 최종 부가물 조합인 A1B1C1D2의 경우만 추가적으로 수행하였다. Table 15은 그 결과를 나타낸 것이다.

Table 15 Cr-comparison according to optimum appendage combinations

Test		Energy saving point of view		Speed point of view	
Combination		A ₁ B ₁ C ₁ D ₂		A ₂ B ₁ C ₁ D ₂	
Fn	Speed (Knots)	Cr(×10 ³)	EHP(ps)	Cr(×10 ³)	EHP(ps)
0.345	15	6.077	1,139	6.283	1,167
0.528	23	5.964	4,002	5.976	4,008
0.689	30	3.902	6,572	3.912	6,583
0.804	35	2.985	8,795	2.846	8,555

연료비용에 우수한 부가물 조합인 A1B1C1D2는 순항속력인 15노트(Fn=0.345)에서 Cr값이 Table 4의 A1B1C1D1 대비 약 -1.6%, A2B1C2D1 대비 약 -6.7%이다. 최대속력인 35노트(Fn=0.804)에서는 Cr값이 A1B2C1D2 대비 약 -6.1%이지만, A2B1C1D2 대비 오히려 약 4.9% 증가되었다. 이는 식(4)의 연료 소모량 계산식에서 전체 운용 속력 중에서 최대 속력이 5%만 할당되었기 때문에 Table 4의 최대 속력에서의 부가물 조합 A2B1C1D2의 최소 저항값보다는 크게 나타난 것으로 판단된다. 그러나 전체 속도 구간에서 A1B1C1D2는 Table 4의 부가물 조합 대비 낮은 저항값을 보이고 있다.

최대 속력에 우수한 부가물 조합인 A2B1C1D2는 최대 속력인

35노트($F_n=0.804$)에서는 C_r 값이 Table 4의 조합들에 비해 가장 낮은 저항 값을 보이지만, 순항속력인 15노트($F_n=0.345$)에서는 다른 조합 대비 다소 높은 C_r 값을 가진다.

Table 15에서 유효마력을 살펴보면 순항속력인 15노트에서는 A1B1C1D2가 A2B1C1D2 대비 유효마력이 약 2.4% 우수하고, 속력이 올라 갈수록 그 차이가 줄어들어 최대속력인 35노트에서는 A2B1C1D2가 A1B1C1D2대비 약 2.7% 우수한 결과를 나타낸다.

부가적으로 트림 제어 성능의 경우 물보라역제장치를 부착한 선형에서는 최대속력에서 약 1.5m의 선미트림이 발생하였으나, 최적 부가물을 모두 부착한 선형의 경우, 약 0.33~0.46m의 선미트림으로 트림 제어량이 크게 나타났다. 특히, A2B1C1D2의 경우 트림이 가장 작게 나타났다. 이는 선미썰기의 각도와 길이가 가장 큰 쌍으로 조합되어 그 영향이 큰 것으로 판단된다. A1B1C1D2의 경우에는 고속 영역에서 상대적으로 선미트림이 크게 발생했으나 저속구간으로 갈수록 트림이 줄어들었다.

5. 결론

고속 반활주선의 저항 성능의 개선과 항주시 과도한 트림의 제어하기 위해 일반적으로 한 개 이상의 부가물들이 조합되어 설치된다. 이때 개별적인 부가물들로 인해 발생하는 트림과 유선 흐름의 특성은 조합된 부가물로 인해 발생하는 유체역학적인 특성과 다르다. 따라서 최적의 조합을 찾기 위해서는 가능한 모든 조합의 경우를 모두 검토해야 하지만, 실험 오류, 횡수, 비용 등의 이유로 현실적으로 수행하기가 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 직교배열을 이용한 실험 계획법을 적용하여 연료 소모량 절감과 최대 속력에 우수한 관점에서의 최적 부가물 조합을 각각 선정한 후 그 결과를 모형시험을 통해 확인하였다.

본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 설계선에 부착되는 개별적인 부가물들의 유체역학적인 특성으로부터 저항, 추진성능과 트림변화에 영향을 주는 설계요인을 도출하고 각 요인에 대하여 실험 기준을 제시하였다.

둘째, 실험 특성치인 잉여저항계수에 대한 주효과 인자의 교호작용을 분석하여 선미썰기의 각도, 물보라역제장치의 높이 그리고 핀 스케그의 크기가 서로 많은 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

셋째, 직교배열을 이용한 실험 계획법을 이용하여 연료 절감과 최대 속력 우수 측면으로 나누어 최적 부가물 조합을 선정하였다. 그 결과 연료 절감 우수에 대한 최적 조합은 기관운용요율에 따라 전 속도 영역에서 상대적으로 잉여저항과 유효마력이 향상되었다. 최대 속력 우수에 대한 최적 조합은 최대 속력에서 잉여저항과 유효마력이 우수함이 확인되었다.

넷째, 직교배열을 이용한 부가물 최적화 방법의 활용으로 전체 속력 구간에서 연료비용이 우수한 부가물 조합 또는 목표 속력에서 최소 저항인 맞춤형 부가물 조합의 선정이 가능하다.

후기

본 연구는 2013년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, J.S. Hong, S. & Kim, H.W., 2006. An Experimental Study on Steering Performance of Tracked Vehicle on Deep-Sea Cohesive Soft Soil by DOE using Orthogonal Arrays. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(4), pp.37-42.
- Clarke G.M. & Kempson, R.E., 1997. *Introduction to Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons: London.
- Gonzalez, J.M., 1989. *Specific Hydrodynamic Aspect of Fast Displacements and Planing Craft*. 13th WEGEMT School and Design Techniques for Advanced Marine Vehicles and High Speed Displacement Ship: Delft.
- Karafiath, G. Cusanelli, D. & Cheng, W.L., 1999. Stern Wedges and Stern Flaps for Improved Powering. *SNAME Transaction*, 107, pp.67-99.
- Karafiath, G. & Fisher, S.C., 1987. The Effect of Stern Wedges on Ship Powering Performance. *Naval Engineers Journal*, 99(3), pp.27-38.
- Kawazoe, T. Nishikido, S. & Wada, Y., 1994. Effect of Fin Area and Control Methods on Reduction of Roll Motion with Fin Stabilizer. *Bulletin of the MESJ*, 22(1), pp.25-32.
- Koh, C.D. Kim, H.C. & Kim, S.Y., 1998. Application of Robust Design Method to a High-Speed Planing Hull. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 12(4), pp.144-151.
- Lee, J.G. Jung, K.H. Suh, S.B. Chun, H.H. & Lee, I.W., 2010. A Study on the Hull Form Design of Semi-Planing Round-Bilge Craft. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(4), pp.59-65.
- Muller-Graf, B., 1991. The Effect of an advanced spray rail system on resistance and development of spray of semi-displacement round bilge hulls. *FAST'91, 1st International Conference on Fast Sea Transportation*, Trondheim, Norway, 17-21 June 1991, pp.125-141.
- Park, C.S. Cho, Y.J. Park, D.H. & Ahn, J.W., 2006. A Study on Ship Shape Design Optimization for RCS

- Reduction Using Taguchi Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(6), pp.693-699.
- Park, H.S. Kim, D.J. Lee, S.K. Park, J.Y. & Rhee, K.P., 2011. The Effect of Appendages of a Water-Jet Propelled High Speed Vessel on the Course Keeping Ability. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(4), pp.357-362.
- Seo, K.H. Lee, J.K. Seo, Y.N. Sun, J.H. & Heo, J.K., 2005. A Review on hull designs and appendages performance for development of a 60m class semi-planing craft. *Conference of The Society of Naval Architects of Korea*, Yongin, 3-4 November 2005 November 2005, pp.869-875.
- Shiming, S. & Yuncai, W., 1982. Methods of improving the resistance and seakeeping qualities of high speed displacement hulls. *RINA Symposium on Small Fast Warships and Security Vessels*, London, 18-21 May 1982.
- Taguchi, G., 1986. *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*, Asian Productivity Organization, John Wiley & Sons: Tokyo.

