자유수면을 포함한 수퍼요트 주위의 점성유동 해석

김태윤*, 현범수†*

한국해양대 조선해양시스템공학부*

Comparisons of Hydrodynamic Characteristics of Superyacht with Respect to the Variation of Hull Form

Tae-Yun Kim* and Beom-Soo Hyun†

Division of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University*

Abstract

There are various hull types on the mid-size superyachts around 30 ~ 45m. In any case, it is important to design the proper hull shape in viewpoint of the reduction of wave resistance, because small vessels such as superyachts are running at relatively higher Froude Number than other merchant ships. FLUENT with a VOF option was employed to investigate the flow fields around the superyachts having three-typical hull types: U-, V-types and catamaran. Overall performances including free surface flow were compared to figure out hydrodynamic characteristics of superyachty by numerical simulation.

※Keywords: Superyacht(수퍼요트), Hull-type(선형), Froude Number(Froude 수), FLUENT (FLUENT), Free-surface Flow(자유표면유동)

1. 서론

최근 들어 국민 소득수준이 향상되고 주 5 일 근무가 본격화되면서 주말을 활용한 여가활동이 크게 늘고 있다. 여가시간이 늘어나면서 육상에서의 레저활동 못지 않게 해양레저활동에 대한 국민의 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 세일링 요트, 모터보트, 카누 등 레저용 선박의 수요가 급격히 증가하고 있으나 국내 생산기반이 열악하여 아직

거의 전량을 수입품에 의존하고 있다.

최근 레저선박시장의 국산화 비율을 높이고 해양레저산업의 저변 확대를 위해 정부차원에서 이 분야에 대한 지원이 시작되고 있는 것은 다행한 일이다.

수퍼요트는 스포츠를 목적으로 하는 통상의 요트라기 보다는 육상의 콘도와 비슷한 개념으로 연안에서의 휴식이나 레저를 위한 공간으로 사용되고있는 중대형 초호화선박이다. 보통 휴식을 취할 수 있는 쾌적한 선실이 제공되며 전용 요리사로부터 제공되는 맛있는 음식을 맛볼 수도 있다. 수퍼요트는 최근 들어 국내에서 개봉하는 영화나 드라마

접수일: 2008 년 1 월 2 일, 승인일: 2008 년 5 월 20 일

† 교신저자: bshyun@hhu.ac.kr, 051-410-4308

마등 각종 대중매체에 종종 등장하여 일반인들의 관심을 끌고 있으나, 국내에서는 이를 체험할 기회가 전무하다. 한국인들이 즐겨찾는 동남아시아 등지에서 관광상품으로 체험할 수 있으나, 그 비용이 아직까지 일반인들에게는 매우 비싼 편이다.

국내 레저선박 건조시장은 아직 초기단계이고, 중소형 조선소에서 외국의 도면을 수입하여 세일링 요트의 실적선을 모방 건조하는 실정이지만 해양레저시장의 확장에 힘입어 앞으로는 점차 확대되어 나갈 것으로 예상된다. 그러므로 중형 레저선박을 건조하기 위한 적절한 설계 및 성능 분석 기술을 조기에 확보하기 위한 노력이 필요하다.

본 연구에서는 국내 조선소등에서 널리 사용되고 있는 FLUENT 를 이용하여 통계자료를 바탕으로 설계된 3 가지 형태의 중형 슈퍼요트의 선형에 따른 장단점을 비교하는 방법으로 유체공학적 특징을 분석해 보았다. 자유수면은 VOF 기법으로 처리하였다. 본 연구에 사용한 FLUENT-VOF 법의 성능검증과 수중익과 상선 선박에의 적용은 Kim(2008), Kim & Hyun(2008)에 소개되었으며 여기서는 슈퍼요트에의 적용만을 다루고자 한다.

2. 슈퍼요트의 유체공학적 특징

슈퍼요트는 대형선박과 달리 비슷한 크기의 선체에 사용자의 취향에 따라 Fig. 1 과 같은 V 형이나 Fig. 2 의 U 형, 쌍동선형 등 여러가지 선형으로 건조되며, 때에 따라 Fig. 3 과 같이 U 형과 V 형의 특징이 혼합된 선체도 존재한다.

Fig. 1 30m-class *Cassiopeia* with V-type hull (www.hollandjachtbouw.nl)

Fig. 2 33m-class *Magellan* Series with round bottom hull(www.kingshipyacht.com)

Fig. 3 Test model of hybrid-type motoryacht

쌍동선의 경우에도 선체에 따라 V 형 또는 활주형 선체를 도입하는 경우가 있다. 그런데, 쌍동선은 단동선에 비해 부양면적이 크게 부족하므로 선체크기가 커지면 V 형 선체의 효율은 급격히 떨어지는 까닭에 작은 선체에 한하여 V 형 선체가 적용되고 있다. 그 대신 Fig. 4 와 같이 Wave Piercer 라는 새로운 형태의 선체를 도입하여 높은 속도와 운항효율을 달성하기도 한다.

슈퍼요트는 보통 24m 이상의 요트를 의미하며 약 30m 이상이 되면 선저의 부양하중이 크게 증가하는 V 형 선체의 사용은 상대적으로 줄어든다. 하지만 비교적 대형임에도 고출력의 엔진을 탑재하고 V 형 선체를 도입하여 고속성능을 낼 수 있는 선박도 다수 존재한다. 선박유체역학적인 관점에서는 U 형이나 V 형 어느 경우에도 Fr 수가 대략 0.35 이상으로 속도가 빠른 편이어서 대형 상선에 비해 상대적으로 고속선박에 속한다.

Fig. 4 Wave piercing high speed catamaran Polaris (www.cld.co.nz)

Table 1 Ship sizes and Froude numbers

Range of LOA	Below 30m	30–45m	45–70m	Over 70m
No. of Ships	276	259	88	26
Mean LOA [m]	24	37	51	79
Ship Speed [knots]	20.2	15.5	13.6	13.9
Fr (Mean)	0.67	0.41	0.31	0.25

Table 1 은 Nam et al.(2007)이 조사한 통계자료를 바탕으로 선체의 크기별 Froude 수를 조사한 것이다. 전체의 85%를 차지하는 45m 급 이하의 선체의 경우 설계 Froude 수가 대략 0.4 이상으로 높은 편이고, 45m 이상의 선체는 0.3 이하로 일반적인 대형 상선과 비슷해지는 경향이 보인다. 따라서 선체저항에서 잉여저항이 차지하는 비중이 다른 대형선에 비해 상대적으로 높아질 것이므로 슈퍼요트의 저항성능을 제대로 평가하기 위해서는 잉여저항, 특히 조파저항을 효과적으로 잘 해석하는 것이 중요하다 하겠다.

3. 슈퍼요트의 대표선형 형상화

본 연구에서는 통계자료로부터 가장 많은 수를 차지하는 45m 이하급 슈퍼요트를 실제로 설계하기 위하여 슈퍼요트에서 대표적으로 발견되는 세가지 선형을 선정하였다. 선체의 크기는 Nam et al.(2007)이 선정한 슈퍼요트의 산술적 평균인 LOA 35m 를 기준으로 정하였다. 선형으로는 추진

장치로 세일을 이용하는 세일요트 선형을 제외하면 U 형, V 형과 쌍동선형으로 구분할 수 있는데, 설계 목표로 정한 35m 급 요트에서는 세가지 선형이 모두 나타나고 있다. 도출된 세가지 대표적인 선형은 중소형선박 설계에 많이 사용되는 Autoship8.2 를 이용하여 3 차원 모델로 형상화 하였다.

Fig. 5 Hull forms of designed ships

Fig. 5(a)의 U 형은 일반적인 배수량형 선형으로서 선체의 속도가 변하더라도 트림의 변화가 적고 비교적 안정적인 주행이 가능한 것이 특징이다. 또 정속항을 선호하는 선주들을 위하여 보통 빌지 킬이나 핀 스테빌라이저 등을 장착하는 선형이다.

Fig. 5(b)는 V 형 선저를 가진 선체로서, 활주선과 유사하게 고속 항주시 선저의 형상에 따라 선측의 물을 배제하여 접수면적을 줄이도록 설계된 선형이다. 본 선형은 고속항주를 즐기는 선주들에게 인기가 있다. 일반적으로 활주선형은 배의 크기가 커질수록 선저에 가해지는 하중이 커지므로 구조적인 보강이 필요하고 효율이 떨어진다고 알려져 있지만, 설계 목표로 삼은 30m ~ 45m 급에서는 빈번하게 발견되고 있다.

끝으로 Fig. 5(c)에 보여지는 쌍동선형은 두 선체 위의 공간을 넓게 활용할 수 있고, 배수량형이나 활주형 선형에 비해 횡안정성이 뛰어나다. 또 U 형이나 V 형 단일 선체에 비해 공간을 수평적으로 활용할 수 있다는 장점이 있어 안락함을 추구하는 선주들이 주로 찾는다. 세 선형의 주요치수는 Table 2 에 나타나 있다.

Table 2 Principal dimensions of three designed ships

	U-type	V-type	Catamaran
LWL(m)	36.7	37.8	35.5
B(m)	7.2	8.03	11.10(total)
D(m)	2.9	3	2.41
Lcb(% aft)	47.9	58.9	56.6
Disp.(Ton)	464.52	421.17	450.8

4. 수치해석을 이용한 선체의 성능비교

세가지 선형의 유체공학적인 성능을 비교하기 위하여 사용해석 코드인 FLUENT6.2.26 을 이용하였다. 슈퍼요트는 선박에 작용하는 저항성분 중 조파저항이 상대적으로 큰 비율을 차지하는 선박이다. 따라서 선체성능 해석을 위하여 자유수면의 적절한 고려가 필수적이므로 이를 위해 수치 격자 내 밀도가 다른 두 유체의 체적 비율을 통해 두 유체의 경계면인 자유수면의 위치를 추적하는 기

법인 VOF 법을 적용하여 계산하였다. FLUENT-VOF 법 이용하면 비교적 적은 계산량으로 조파형태와 저항을 효과적으로 계산하는게 가능하다 (Kim 2007) .

수치해석을 위한 격자계는 GRIDGEN ver.15.10 을 이용하였고, 평균 130 만개 정도의 격자를 생성하였다. 격자계는 선체주위 수치해의 정도에 영향을 주지 않게 하기 위하여 선체길이 L 을 기준으로 선수방향으로 2L, 폭 방향으로 2L, 선미 하류방향으로는 4L 정도의 범위를 고려하였다. Fig. 6 와 Fig. 7 에는 대표적으로 U Type 선체주위의 격자계와 경계조건이 주어져 있다. 쌍동선형의 경우에는 두 선체 사이에 공간으로 인해 약 50 만개 정도의 격자수 증가가 있었다. 자유수면 부근의 상세한 고려를 위하여 자유수면 위치($z=0$)에 격자를 집중시켰으며 선체 난류경계층 내부유동의 적절한 공간분해능을 확보하기 위하여 트랜섬 선미를 제외한 모든 영역에서 y^+ 는 대략 70~150 사이가 되도록 격자를 생성하였다. 계산에 미치는 격자의존도 등의 검토는 Kim(2007)에 나타나 있으므로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

Fig. 6 Grid system around U-type hull (Typical method)

Fig. 7 Boundary condition & grid system

설계속도는 10 노트 ($Fr=0.26$)로 정하였으며 본 연구에서 해석한 속도의 범위는 선속 4~19 노트 ($0.1 < Fr < 0.5$)이다. 한편 Reynolds 수가 10^7 이상으로 커지면 선체표면 격자생성에 어려움이 존재하고 막대한 계산시간이 요구되므로 본 계산은 축척이 1/10 인 모형 스케일로 가정하여 Reynolds 수의 범위가 $1.8 \times 10^6 \sim 8.6 \times 10^6$ 정도 되도록 하였다.

5. 계산 결과 검토

5.1 선체주변의 파형

Fig. 8은 설계 Froude 수 ($Fr=0.26$)에서 계산한 자유수면의 형상을 보여주고 있다. 파고 등고선을 비교해 보면 U 형 선체의 경우 다른 두 선형에 비해 파의 기복이 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 U 형 선체의 경우 다른 선형에 비해 수면과 접촉하는 면이 크고 상대적으로 넓은 단면형상을 가지기 때문인 것으로 생각된다. 이로 미루어 보아 U 형 선체는 고속 주행엔 다소 불리한 선형으로 생각할 수 있다. 한편 쌍둥선형 선체는 양 선체사이에서 파의 간섭현상이 크게 일어나는 것을 볼 수 있다. 안쪽 선체의 형태를 바꾸거나 적절한 선체간격의 설정하는 등의 노력을 통하여 조파저항을 감소시키는 노력이 요구되는 선형임을 다시 한번 확인할 수 있다.

5.2 선체 표면 유선

Fig. 9는 $Fr=0.26$ 에서 각 선체 표면의 유선을 나타내고 있다. U 형 선체의 경우 물과 접촉하는 면이 넓어 점성저항의 비중이 상대적으로 클 것으로 보이며, V 형 선체는 선수를 지나간 유선이 대

Fig. 8 Wave Patterns at $Fr = 0.26$

Fig. 9 Limiting streamlines on hull surface

부분 선저로 이동하고 선측을 통과하는 유선이 거의 없다. U 형과 비교하여 V 형 선체와 쌍동선형은 통상의 전체저항 성분중 조파저항 성능 관점의 최적설계가 필요한 선형임을 간접 확인할 수 있다. 한편 쌍동선형의 경우 U 형 선체의 유선과 비슷한 유선분포를 보이고 있으며 흥미로운 것은 선체 중심선을 향하고 있는 선체와 바깥쪽 선체의 유선이 크게 다른 양상을 보이고 있는 것이다. 두 선체 사이에서의 파계 간섭을 반증하듯 선체 측면에서 물결치는 형태의 유선을 보이고 있어 향후 선체 사이의 간격을 결정하거나 안쪽 선체의 형태 등을 설계할 때 고려해야 할 주요사항으로 여겨진다.

5.3 선체 저항성능

세 종류 선형의 저항특성을 알아보기 위하여 $Fr = 0.1 \sim 0.5$ 범위에서 선체의 저항특성을 알아보았다. FLUENT-VOF 로 계산한 마찰저항과 압력저항 값은 각각 선체표면에서 접선방향과 법선방향 응력성분을 진행방향으로 적분한 값이기 때문에 실제 선박의 점성저항, 잉여저항등과 직접 비교될 수는 없지만 각 선형의 저항특성을 비교 하는 데는 도움이 될 것이다.

Fig. 10 은 각 선형의 마찰저항곡선을 ITTC1957 년 모형선-실선 상관곡선과 비교하여 나타내었다. 운항중 출수가 China 에 의하여 제한되기 때문에 선체 측면 침수표면적의 감소로 인하여 마찰저항의 경우 V 형 선체가 가장 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 한편, U 형과 쌍동선형의 경우는 전체적으로 마찰저항계수가 ITTC Line 과 비슷하게 예측되었다.

Fig. 11 과 Fig.12 에는 세 종류 대표선형의 압력저항계수와 전저항계수가 나타나 있다. U 형 선체의 경우 선박조파저항의 특징적인 모습인 Hollow 와 Hump 가 나타나고 있어 파계간의 간섭에 의한 조파저항의 감소효과가 있음을 짐작할 수 있다. 현재의 결과만으로는 단정하기 어려우나 Froude 수 0.3 을 기준으로 U 형과 V 형 및 쌍동선형의 장단점이 대조를 이루고 있다. $Fr > 0.4$ 구간에서 U 형은 다른 두 선형에 비해 극히 큰 저항값을 나타냄으로써 고속으로 올라갈수록 저항성능이 떨어

어짐을 보여주고 있다. 쌍동선형은 선체 간격의 최적화를 통하여 $Fr > 0.3$ 이상에서 유용한 선형으로 사용될 가능성도 확인하였다. 현재까지 매우 빈약한 자료만이 얻어졌지만 전산유체역학 기법을 활용한 본 해석법의 정도가 연구과정에서 어느 정도 검증되었기 때문에 추후 외관이나 인테리어 등

Fig. 10 Frictional resistance coefficients

Fig. 11 Pressure resistance coefficients

Fig. 12 Total resistance coefficients

과 연계하여 수퍼요트를 설계할 때 각 선형의 설계 속도 결정시 기본자료로 활용이 충분히 가능할 것으로 기대된다.

6. 결론

중소형 고급선박인 수퍼요트의 대표제원을 선정해 3 차원 모델링을 하였고, 선박의 저항성능해석을 시도하였다. 계산결과를 검증할만한 실험자료나 계산사례, 유사 실적선에 대한 설계자료가 부족하여 본 연구결과를 일반화하기는 어려웠다. 하지만, 수퍼요트에서 대표적으로 발견되는 세가지 선체를 선정하여 Autoyacht 프로그램을 이용한 선체설계를 하고, FLUENT-VOF 법을 이용하여 선체주위 유동특성을 비교 분석하였다. 또, 여러 선속에 따라 각 선체가 가지는 저항특성을 정성적으로 파악할 수 있었다. 차후 본 연구에서 나타난 문제점들을 보완하여 각 선형이 나타내는 저항성능상의 차이점을 파악하고, 각 선형의 저항곡선을 바탕으로 선형의 변환을 통하여 각 선형별로 최적의 저항성능을 내는 수퍼요트 선형을 개발하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 2006 특정기초연구사업인 “사용자지향 모델을 이용한 수퍼요트의 통합설계기술 개발” 과제의 일환으로 수행된 것으로서 귀 기관의 지원에 감사 드린다.

참 고 문 헌

- Nam, J.H, Hyun, B.S., Kim, T.Y and Kim, D.H., 2007, “Analysis of Hydrodynamic Performance and Establishment of Modeling Technique for Determination of Preliminary Hull Form of Superyachts,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 4, pp. 451-458.
- Kim, T.Y., 2008, “Numerical Simulation of Ship Resistance Characteristics Using VOF Method,” Master Thesis, Korea Maritime Univ..
- Kim, T.Y. and Hyun, B.S., 2008, “Analysis of Flow Field Including Bodies Steadily Moving Around the Free-surface by FLUENT-VOF Method,” Journal of Korean Inst. Of Navigation and Port Research, Vol. 32, No. 1, pp. 9-14.

< 김 태 운 >

< 현 범 수 >