

고성능 세일링 요트의 최근 연구 동향에 관한 고찰

유재훈, 안해성, 박철수, 이영연, 반석호(한국해양연구원 해양시스템안전연구소)

1. 서 론

세일링 요트에 적용되어지는 과학 기술은 매우 광범위 하다. 최근 전 세계에서 열리고 있는 각종 요트 경기장의 설계와 제작에는 첨단 과학 기술들의 적용이 활발하게 이루어져 경기장 자체를 고성능요트(high performance yacht)라 부를 정도로 기술 집약의 고성능의 선박으로 개발되고 있으며, 그 관련 산업은 최첨단 기술집약적 산업으로 평가되고 있는 상황이다. 특히, 1983년 이후로 국가 간의 치열한 기술 경쟁의 장이 되고 있는 아메리카스컵 대회(America's cup challenge)를 포함하여, 오대양을 일주하는 볼보레이스(Volvo ocean race) 등, 세계적으로 중요한 요트 경기에는 천문학적인 자본이 투자되어 상상을 초월하는 고성능의 요트가 만들어지고 있다. 본 글에서는 2002년과 2006년 2회에 걸쳐 뉴질랜드에서 개최되어진 High Performance Yacht Design Conference(이하, HPYD)에서 발표된 연구 성과들을 바탕으로, 이러한 고성능 요트가 만들어지기까지 어떠한 연구 활동들이 이루어지고 있었는가를 알아보고 2007년 아메리카스컵 대회에 출전할 미국의 BMW-Oracle호(현재 예선전 1위)와 2007년 마무리되는 볼보레이스의 규정표준선 VO70을 예를 들어, 고성능 요트에 대한 소개와 기술동향을 살펴보고자 한다.

2. 아메리카스컵 대회(America's Cup Challenge)

아메리카스컵 대회는 종종 “바다의 포뮬라원(formula-one)” 경기라고 불리기도 한다. 그 이유는 자동차 경기와 같이 하나의 같은 규칙으로 만들어진 배로서 하는 경기이기 때문이다. “포뮬라원” 경

기에서는 아무리 우수한 운전기술을 가진 선수라 해도 자동차의 성능이 좋지 않으면 우승할 수 없다. 마찬가지로 아메리카스컵 대회에서도 아무리 훌륭한 선원들로 경기에 임한다 해도 훌륭한 성능의 요트가 아니라면 감히 우승을 꿈꿀 수도 없다. 우승을 위해서는 경기장을 건조하는데 사용되는 재료와 건조 기술 또한 중요한 요소가 된다. 우수한 선수를 키워 훌륭한 팀을 만드는 것뿐만 아니라 심층적이고 세심한 연구와 그 결과를 설계에 반영하는 것이 중요하다. 보통 경기장은 특성이 다른 두 척의 모선(parent ship)으로부터 각각 그 특징을 강조하거나 개선하는 방법으로 설계되어 성능 비교를 통해 끊임없이 개선되어진다. 이 과정에서 매우 심층적인 분석과 시뮬레이션을 이용한 연구가 적용되며, 최종적으로 만들어진 경기장은 설계연구진과 제작진의 명품으로 탄생하게 된다.

경기장 설계와 제작의 출발점은 아메리카스컵대회 규정으로부터 시작하게 된다. 2007년 벌어지는 32회 대회에서는 5차 개정판이 적용되며, 다른 팀보다 조금이라도 빠르고 성능이 우수한 경기장을 보유하기 위해서는 규정이 허락하는 범위 내에서 누가 가장 혁신적인 장치나 선형을 설계하여 적용하는가가 관건이 된다.

4차 개정판과 5차 개정판과의 가장 두드러진 차이를 살펴보면, 킬(keel) 중량의 감소, 풍하향 범주(downwind sailing)에 사용되는 세일 면적의 증가인데 이 두 가지 규정의 변화 역시 어떻게 하면 더 빠른 경기장을 만들 수 있는가와 같은 맥락의 규정이라 볼 수 있다. 즉, 규정과 적용기술, 그리고 이에 대한 연구가 하나같이 어떻게 하면 더 빠른 요트를 만들 수 있는가에 초점을 두고 있다. 물론 전

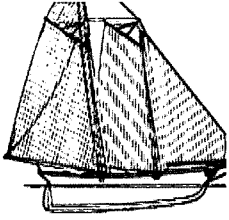


Fig.1 America(1851)

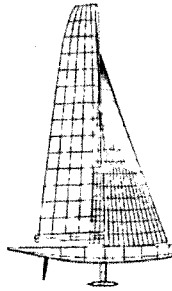


Fig.2 Alinghi(2003)

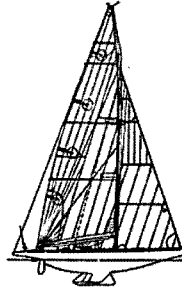


Fig.3 Australlia II (1983)

체적으로 살펴보면 기본 제원(전장 24미터, 폭 4미터, 마스트 최대 높이 33미터, 세일 최대 면적 720 평방미터 등)은 매우 오랫동안 변함이 없다. 그러나 이런 기본 제원의 불변에도 불구하고 대회 초창기의 경기정(아메리카호, 1851년, Fig. 1)의 5~6노트 선속에서 2003년 우승자인 스위스의 알링기(Alinghi)호 (2003년, Fig. 2)가 보여준 13노트 (최고선속 18노트)의 선속으로까지 최근 20년 동안 두 배가 넘는, 비약적으로 개선된 속도를 보여주었다. 조선공학을 연구하는 우리들의 눈에는 실로 놀라운 일이라 할 수 있다.

1983년 호주가 네덜란드의 마린(MARIN)과 공동 연구 끝에 날개가 달린 킬(Fig. 3)을 개발하여 우승한 것을 계기로 아메리카스컵 대회에 수많은 과학 기술이 본격적으로 접목되기 시작하였다.

경기 규정에 의해 설계가 개선되어지는 예를 들어 보면, 경기규정에서 벌브킬의 중량을 19톤에서 18톤으로 최대값 제한을 두게 되면, 설계자는 그로 인해 손실되는 복원력을 만회하기 위해 킬의 깊이를 4.0m에서 4.1m로 100mm 키우게 된다. 이때 좀 더 킬, 스트럿의 코드길이를 줄이고, 날개 단면을 개선하여 좀 더 높은 양항비의 킬을 도출해 낸다. 물론 중량의 대부분을 차지하는 벌브의 모양을 좀 더 작은 저항을 가지도록 개선한다. 이러한 설계 작업을 위해서 전산기를 사용하는 수치계산과 더불어 최종적으로 예인수조시험 또는 풍동 시험을 병행하게 된다. 최근에는 유동 박리 현상(flow separation)뿐

만 아니라 몸체와 날개 사이 접합부에서 발생하는 와류 현상(vortex shedding)과 이로 인한 유기 저항(Induced drag)을 개선하기 위한 수치 시뮬레이션과 실험을 수행하기도 한다. 세일에 대한 예로서, 경기 규정에서 풍하향 세일 면적의 허용 최대값을 키워주면, 늘어난

면적보다 더 높은 추진력을 얻기 위한 연구가 진행되어 새로운 결과물이 탄생하기도 한다. 기존의 대칭형 스피네이커(spinnaker)를 미풍이나 비스듬한 풍향 상태(broad reach)에서 더욱 효과적일 수 있도록 비대칭형 제네커(gennaker)로 개선할 뿐 아니라 세일의 외곽형상과 캠버분포를 변화시켜가며 수많은 수치계산과 실험을 통해 좀 더 효율적인 세일을 만들어 낸다.

3. 볼보레이스 (Volvo ocean race)

아메리카스컵 대회에 버금가는 유명한 요트 경기로서 볼보레이스를 들 수 있다. 볼보레이스는 1973년부터 1998년까지 4년에 한 번씩 벌어지던 휘트브레드(Whitbread) 대회가 2001년부터 그 이름과 경기 규모를 달리하면서 탄생한 세계 일주 경기이다. 아메리카스컵 대회는 짧은 거리를 왕복하면서 벌어지는 경기인 반면, 볼보레이스는 세계를 일주하여 약 32,000마일의 항해 거리를 갖는 원양 항해 경주이다. 1973년 7개국의 17개 요트 팀에 소속한 167명의 요트 선원들이 참가한 제1회 대회는 영국 해협에 접한 포츠머스(portsmouth)에서 출발하여 전 세계를 쉬지 않고 항해하는 시합이었으며, 최근에 벌어지는 경기도 세계를 일주하는 근본적인 시합 규정은 동일하다. 대회의 초창기엔 경기정 자체에 대한 투자보다는 강인한 체력과 정신력을 소유한 선원들과 냉철한 판단력과 승부욕을 가진 선장에 의해 승패가 가려졌으나, 21세기에 이르러 아메리



Fig. 4 Racing Yacht for Volvo ocean race

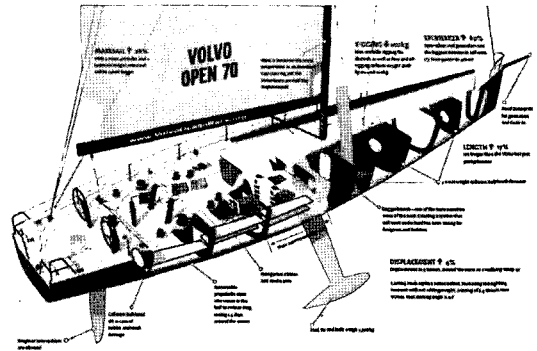


Fig. 5 Yacht for Volvo ocean race

카스컵 대회처럼 최첨단 과학 기술을 접목하면서 경기정의 성능이 승패에 중요한 변수가 되는 획기적인 요트 경기로 탈바꿈하게 된다. 최고 선속이 30 노트가 넘고, 평균 선속이 22노트 정도인 이 볼보레이스는 아메리카스컵 대회와는 달리 다음과 같은 개념의 경기 규정으로 벌어진다.

“경기에 참가하는 경기정은 가장 최신의 개념으로 만들어진 것일 것. 따라서 선체 제원에 대한 경기 규정도 끊임없이 진화시킨다.”

이런 규정으로 만들어지는 최근의 요트는 속도 극대화를 위해 초경량화된 선체에 경량의 캔팅킬(canting keel)을 부착하고, 다수의 러더와 추가적인 대거보드(dagger board)를 사용하며, 주로 활주(planing) 상태로 범주하며, 무엇보다도 매우 빠르고 민첩하다. 경기는 지중해를 출발하여 희망봉을 돌아 호주의 멜버른, 브라질의 리우데자네이루, 미국의 볼티모어, 영국의 사우스햄튼, 스웨덴의 예테보리를 거쳐 발틱해에서 끝나게 된다. 특히 남극에 가까운 항로를 선택할수록 더욱 강한 바람과 최단의 항로를 유지할 수 있으므로, 과도할 정도로 극한의 경기를 펼치게 되는 경기이다. 본 대회에서 필요로 하는 경기정에 대하여 세일러들은 스피드와 힘 그리고 안락함을 요구하며, 경기 주최측은 지속성과 안전함을, 그리고 스폰서들은 혁신과 흥분을 기대하게 된다. 결국 이러한 조건들이 서로 잘 융합되어 만들어진 요트가 볼보레이스의 경기정이 되는 것이다.

볼보레이스의 경기정을 살펴보면, 70피트 정도의 전장을 가지며, 아메리카스컵 대회의 선형과는 달리 매우 천홀수의 납작한 선형을 가지고 있다. 하루에 500마일 이상을 항해해야 하는 경기임으로 속도와 충분한 복원력의 확보가 최우선이다. 이러한 선형의 형태는 아메리카스컵 대회 경기정들이 풍상향(upwind) 범주를 위주로 최적화되는 것과는 달리, 주로 풍하향 범주를 위주로 설계되어진 것으로서 표면 활주 효과를 최대한 살리기 위한 선형이다. 초경량 선체에 워낙 광폭의 선형이다 보니 횡경사상태에서 중앙에 위치한 러더는 노출되기 쉬우므로 좌, 우현으로 2개의 러더를 장착하게 된다. 또한 복원력의 향상을 위하여 캔팅킬을 사용하게 된다. 캔팅킬이란 횡경사가 발생하는 반대의 현으로 7톤 정도의 중량을 가진 벌브 킬을 최대 40도까지 각도 조절이 가능하도록 만들어진 킬을 말한다. 하지만 이렇게 각도가 조절된 킬은 횡투면적의 감소로 양력 발생에 불리함이 생기게 되므로, 충분한 양의 양력을 위해 별도의 대거보드를 설치하게 된다. 이러한 시스템은 기존의 불박이 킬보다 25% 정도의 복원력 향상을 기대할 수 있으며, 이로 인해 줄어든 횡경사는 세일의 유효 면적의 감소를 방지하여 더 효율적인 추진력을 얻을 수 있게 된다. 메인세일의 면적은 180 m² 정도이며, 집세일은 120 m², 그리고 480 m² 넓이의 스피네이커를 장착한다. 이러한 선형과 세일의 채택으로 평균 22노트의 선속으

Table 1. Dimensions of VO70

LOA	21.5 m
LWL	19.5 m
Beam (max)	6.08 m
Draft	4.5 m
Displacement	12,500~14,000 kgs
Ballast (keel)	6,000~7,500 kg
Sail Area (main)	180 m ²
Sail Area (jib)	120 m ²
Sail Area (spinnaker)	300~480 m ²

Table 2. Dimensions of BMW-Oracle (for ACC)

LOA	26.0 m
LWL	20.0 m
Beam (max)	4.5 m
Draft	4.1 m
Displacement	24,000 kgs
Ballast (keel)	19,000 kgs
Sail Area (main)	200~230 m ²
Sail Area (jib)	150 m ²
Sail Area (spinnaker)	500 m ²

로 향해하게 되나, 최고 속도는 30노트가 넘는 고성능의 세일링 요트가 된다. 거주부의 경우 장기 항해를 위한 최소의 설비를 갖추지만, 총 9명으로 제한된 선원들을 위한 안락함과 편안한 활동을 위해 인간공학적인 설계를 갖추게 된다.

4. 설계 동향 및 관련 기술

4.1 선체 구조

요트 대회에 규정만 포물라원 자동차 경주와 유사한 것이 아니라 고성능 요트의 선체 재질 또한 매우 비슷하다. 대부분의 선체가 탄소섬유(carbon fiber)와 허니콤(honeycomb) 구조로 만들어지게 되며, 이러한 신소재의 사용으로 인해 가벼우면서도 튼튼한 선체가 된다. 아메리카스컵 대회 경기정에서는 모든 고정 탑재물이 적재된 전체 선체의 총 중량은 24톤이지만 선체만의 중량은 고작 2톤에 불과하다. 선체는 최소의 저항으로 빠른 속도를 가질 수 있도록 길이/폭 비는 6:1로, 매우 작은 폭으로 최적화되어 전장 24미터에 선평은 4미터가 된다. 이렇게, 어찌 보면 가늘픈 선체에는 높이 33미터의 거대한 마스트가 어마어마하게 넓은 세일을 장착하고 있게 된다. 마스트 자체의 중량은 750 kg에 불과하지만 모든 리그가 결합된 상태에서 선체로 전달하게 되는 압축력은 50톤이나 되므로 이에 대한 구조 설계 및 재질 선택이 이루어져야 한다. 선체의 폭

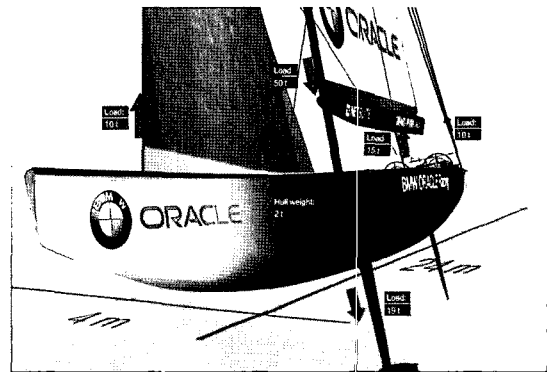


Fig. 6 Loads on hull

에 비해 과도하게 높은 마스트의 탑재를 위해서는 마스트를 지지하는 사이드스테이의 매우 큰 인장력이 요구되는 데, 이 경우 좌우 각각 15톤 정도의 인장력이 작용하게 된다.

그 밖에 선체에 작용하는 고정적인 외력들을 살펴보면, 킬의 중량 자체가 19톤으로서 선체하부에 작용하는 가장 큰 하중이 되며, 선체 자체의 중량이 2톤, 포스테이에 의한 인장력이 10톤, 백스테이에 의한 인장력이 10톤 정도이다 (Fig. 6). 특히 선체의 앞뒤에서 작용하는 각각의 10톤의 인장력은 선체 자체를 휘어버리는 매우 큰 외력으로 작용하게 된다. 이러한 하중의 작용은, 그 결과로 선수를 기준으로 선미가 약 50cm 정도 휘어져 올라가는 현상이 나타날 정도이다 (Fig. 7).

선체의 설계 및 제작에 있어서 가장 중요한 것은

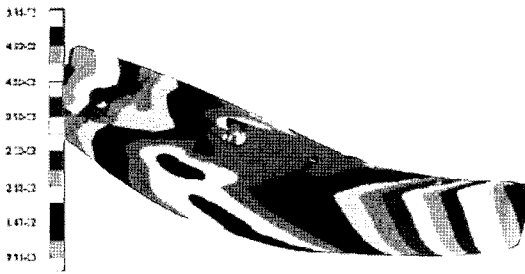


Fig. 7 Deformation simulation of Hull Structure

필요한 강도의 확보와 경량화이다. 경량화의 경우, 선체의 중량을 조금이라도 줄일 수 있으면 나머지 중량은 모두 킴 벌브로 모아줄 수 있게 되며, 이는 성능 향상의 가장 효과적이고 쉬운 수단이 된다. 어찌 보면 가장 중요한 승리의 해결책은 선체 경량화에 달려있다고 볼 수 있다. 대회 출전용 경기정의 선체를 설계한 경험이 있는 한 디자이너는 마치 하나의 외줄을 타는 느낌이었다고 말한다. 공학자의 견지에서 보면 안전계수(safety factor)가 1.0에 가깝거나 경우에 따라 정확히 1.0인 설계라는 것이다. 이러한 불안감을 해소하기 위해서는 기존의 재료를 사용하고 안전계수를 낮추는 설계를 하는 것보다는 최첨단 소재를 적용하여 안전 계수가 확보된 배를 만드는 것이 훌륭한 방법이 된다. 최근 몇몇의 중요한 경기에서 우승을 예상하던 팀들이 시험 중에 마스트나 선체가 파괴되어 시험을 포기한 적이 종종 있기 때문이다. 수많은 구조물을 설계한 경험과 첨단 도구를 이용한 해석이 총 동원되어 설계되고 제작되어지는 것이 바로 오늘날의 고성능 요트들이었다.

4.2 선형

고성능 요트는 대부분 하나의 경기를 목표로 설계 및 제작되어지게 되며, 초기 선형의 도출을 포함하여 전반적인 선형 설계가 규정에 의해 주어진 제한 조건에 대해 저항성분 별로 세심한 검토를 통해 최소 저항을 가질 수 있는 기본 제원과 초기 선형을 추출하여 이루어지게 된다. 선형에 대한 최우선 고려사항은 물론 저항성능의 최적화이지만, 경

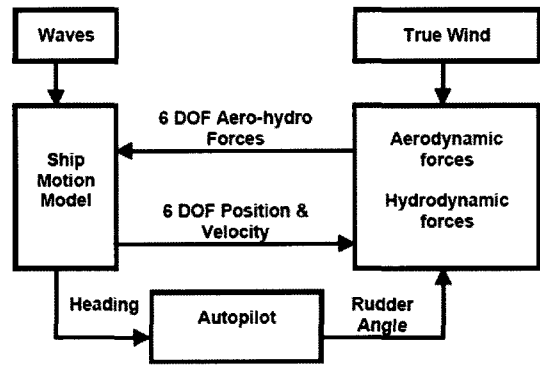


Fig. 8 Schematic of PPP

기정의 경우 항해를 주도하는 선장의 특성이나 전술적인 상황에서 필요한 조종 성능을 발휘할 수 있도록 개선해 나가는 절차를 갖는다. 최근에 아메리카스컵 대회에 출전하는 대부분의 경기정은 길이폭 비가 매우 큰 세장형의 선형으로서 파랑관통(wave piercing) 능력이 뛰어난 특성을 가지며 태킹(tacking) 등과 같이 급격한 선회 시에 조종이 쉽고, 이로 인한 선속 저하를 줄일 수 있도록 선수의 너클(knuckle) 부가 수면 위로 노출된 개선된 구축함형 선수 형태를 채택하고 있다. 이러한 선형 설계에는 모형시험 및 수치 시뮬레이션이 필수불가결한 설계 도구로서 가장 중요한 설계 절차가 된다. 초기 선형이 도출되면 특성이 조금 다른 다수의 선형을 개별적인 방법으로 추출해낸다. 이렇게 만들어진 후보 선형들은 먼저 VPP(velocity prediction program)과 PPP(performance prediction program, Fig. 8)에 의하여 초기 성능을 검토하고, 수치 시뮬레이션(Fig. 9~10)을 통하여 세부적인 선형 개선과 소수의 후보선형으로 추려나간다.

이후 선정된 소수의 선형을 예인수조 시험(Fig. 11)을 통해 성능을 확인하게 되며, 예선이 충분하면 이러한 선형으로 여러 척의 실선을 제작하여 실험역 시운전과 성능비교 시험을 통해 최종 경기선단을 구성하게 된다. 보통 선단의 구성은 예정된 경기구역의 평균 풍속과 파도의 상태에 적합한 선형으로 이루어지게 된다.

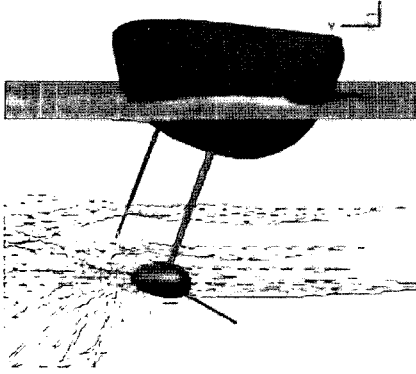


Fig. 9 Flow simulation over the keel

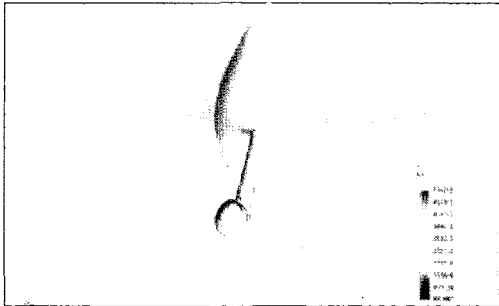


Fig. 10 Generated wave simulation of America's cup yacht

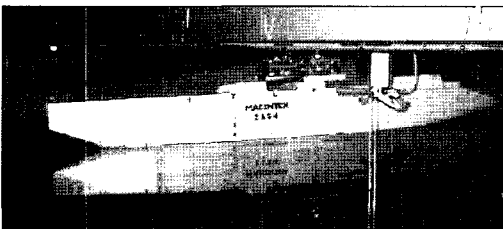


Fig. 11 Towing test of a yacht

4.3 킬

아메리카스컵 대회 규정에 의해 설계되는 선체의 중량은 24톤 정도이며, 이 중에 킬이 분담하는 중량은 18~19톤이 된다. 킬은 설계자에게 있어서는 가장 훌륭한 성능의 것으로 만들고자 하는 도전 대상이 된다. 필요한 최소의 구조물로서 구조 강도를 유지하고, 대신 유체역학적으로 가장 고성능의 킬을 설계하는 것이 관건이다. 원하는 양력을 위해서 혁신적인 킬이 요구되어지며, 이를 위해서는 누가

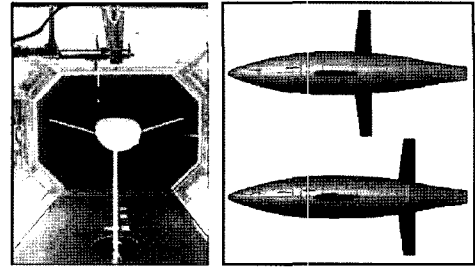


Fig. 12 Wind tunnel tests of winglet bulb keel

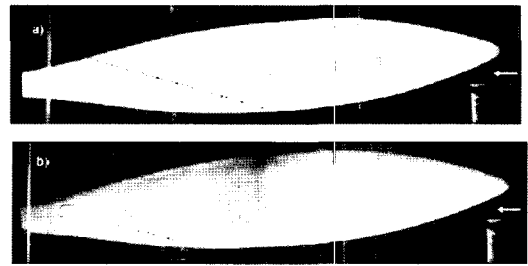


Fig.13 Yawed towing test of keel bulb



Fig.14 CFD calculation of winglet keel (grid)

더 좋은 도구, 즉 CFD 프로그램이나 모형시험 장비를 가지고 있느냐와 이 바탕으로 누가 더 혁신적인 아이디어를 내느냐가 중요하게 된다(Fig. 12~14). 정도가 높은 CFD 프로그램은 킬과 벌브의 최적 형상을 도출한 후 최적의 부착 위치를 선정하기 위한 설계 과정에 매우 효율적인 도구가 될 수 있다.

킬은 일정한 속도 이상에서는 박리 현상의 발생과 함께 주기적인 진동을 유발하며, 이로 인해 비교적 큰 양의 양력 감소가 발생된다. 이러한 문제는 구조역학 특히 동적문제를 좀 더 심층적으로 해석하고 설계와 제작에 반영할 것을 요구하게 된다. 물론 좀 더 가벼우면서도 견고한 재료와 구조의 적



용이 최종적인 성능 개선의 관건이 된다.

4.4 리그 (Rig)

요트에 세일을 장착하고 이를 원하는 데로 조절하기 위해서는 리그, 즉 마스트(mast)와 붐(boom), 그리고 이들을 지탱하는 와이어(wire)들이 장치되어지게 된다. 최근 아메리카스컵 대회에 사용되는 마스트의 중량은 약 750kg으로서 33미터의 마스트가 이 정도의 중량을 가진다는 것은 그 비중이 0.3 이하의 초경량체여야 한다. 이를 위해 대부분 탄소 섬유를 사용하여 만들어지며, 일반적인 상태에서 설계 하중은 축방향으로 50톤을 지탱하게 되므로 이에 대한 분석과 설계가 이루어진다. 붐 역시 탄소 섬유로 만들어지며, 메인세일의 하단부를 고정시켜 전체적인 입사각을 조절하게 된다. 셔라우드(shroud)는 마스트를 좌우로 지지하게 되며 약 25톤의 장력을 담당하게 된다. 아직은 신소재보다는 스테인레스강을 사용한다. 셔라우드와 마스트를 연결하는 스프레더(spreader)는 총 4쌍이 사용되는데 가장 상단의 한 쌍은 별도의 시스템으로 다이아몬드 형상으로 마스트를 지지하게 된다. 1995년 이후 만들어진 경기정들의 메인 세일은 기존의 삼각형이 아닌 위가 둥근 사다리꼴에 가까운 형상을 가지기 시작했다. 이는 가장 효율적인 하중분포로 알려진 타원형 분포를 위해서이다. 이런 모양의 메인 세일은 기존의 리그 형태로는 세일 상단의 리치(leech)에 충분한 장력을 가해 효율적인 양력을 만들기 힘들 뿐만 아니라 캠버(camber)를 조절하기가 쉽지 않다는 문제가 있었다. 이러한 문제점을 개선하기 위한 방법으로서 마스트 상단에 다이아몬드 형태의 독립적인 리그를 구성하게 되며, 이를 밀레니엄리그(millennium rig)라 부른다. 흔히 경기 중 특히 스타트를 하기 전에 한명의 크루(crew)가 마스트 상단까지 올라가서 무언가를 조절하는 모습을 볼 수 있는데, 이것이 밀레니엄리그를 경기당일 바람과 파도의 상태에 맞추어 조절하기 위한 작업이다.

백스테이는 마스트를 지지하는 것뿐만 아니라 마

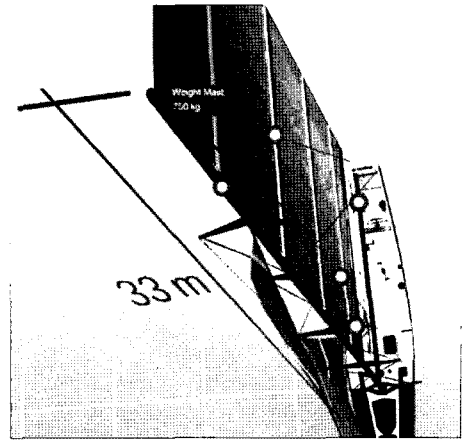


Fig. 15 Rig of ACC yacht

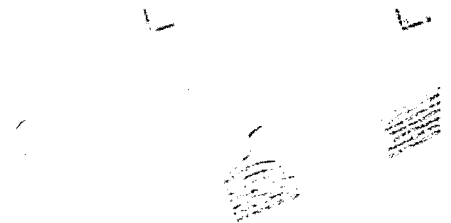


Fig. 16 Flow simulation over mast

스트 자체의 휘어짐을 조절하여 세일의 캠버, 특히 세일 상단의 캠버를 조절하는 장치로서, Aramid 계열의 소재를 사용해 만들어지며 12톤의 장력이 가해지는 것으로 설계되어진다. 전체적으로 이런 리그의 설계는 하중의 지지를 위한 구조역학적인 설계와 공기 중의 항력을 최소화 하기 위한 공기역학적인 설계를 겸하게 된다. 또한 마스트와 붐의 경우 이와 부착되는 세일과 연동하여 양력 손실이나 항력 증가를 최소화하기 위한 설계가 이루어진다(Fig. 16).

4.5 세일

아메리카스컵 대회의 경기정은 마스트 하나에 삼각형 형태의 메인세일과 제노아(genoa) 세일을 기본으로 장착하는 슬루프정(sloop)에 속하며, 세일은 동시에 두 장까지만 부착되도록 규정되어 있다(Fig. 17). 풍상향 범주 시에는 메인 세일과 제노아 세일을, 풍하향의 경우에는 메인세일과 스피네이커를 부

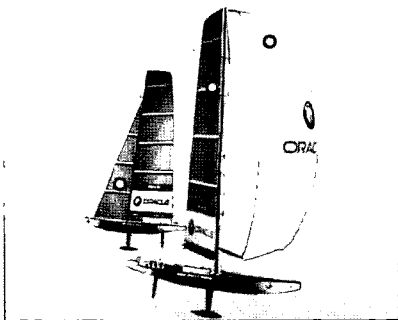


Fig. 17 Sail systems of ACC yacht

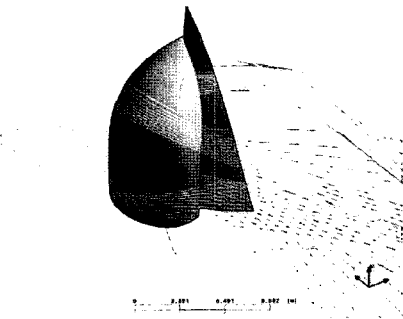


Fig. 18 Flow simulation over sails (downwind)

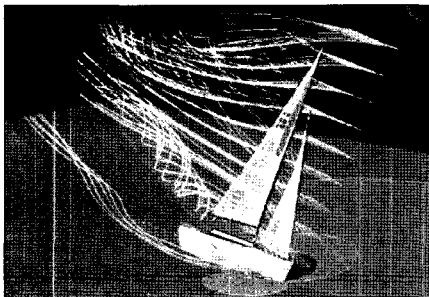


Fig. 19 Flow simulation over sails (upwind)

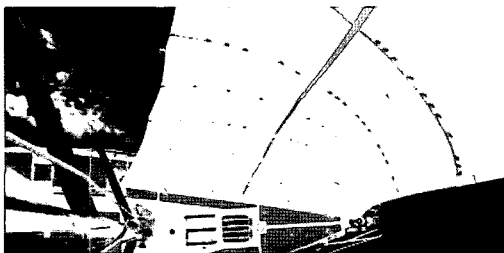


Fig. 20 Flow measurement over sails

착하게 된다. 메인세일은 한번 장착되어지면 경기 중에는 교체하지 않는 세일이다. 따라서 모든 입사 각 및 풍상 각에 대해 최적화되어야 한다. 보통은 풍상향에 맞추어 설계되어지게 되며, 약풍, 중풍, 강풍으로 구분하여 세 종류의 세일을 설계하여 준비하고 있다가 경기가 시작되기 전 바람과 바다의 상태를 보고 부착할 세일을 결정하게 된다.

세일의 형상은 3차원으로서 최근에는 평면의 세일 조각을 연결하여 3차원으로 만드는 3차원 재단 방법을 사용하지 않고, 전체를 3차원 형태로 만드는 3DL(three-dimensionally laminated) 또는 3DR(three-dimensional revolving) 방식으로 제작된 세일을 사용한다. 즉, 세일 형상을 3차원 몰드로 제작하고 그 위에 케블러(kevlar)와 탄소섬유를 혼합하여 마이러(mylar)로 적층해 만들어내거나, 아라미드 섬유를 사용해 3차원 형상을 직접 직조해 낸다. 형태 자체만 3차원이 아니라 바람과 리그에 의해 국부적으로 변형되는 세일면의 조절을 위해 전체적인 섬유조직의 밀도가 다르게 만들어지며, 이를 위해 유체-구조 탄성 및 변형 해석을 수행한다(Fig. 18~21). 메인세일은 200~230㎡의 면적에 100kg이 넘는 중량을 가진다. 세일의 설계에는 유체역학, 구조역학, 재료역학이 총동원되고 세일 제작자와 선체 설계자, 선장 그리고 크루들의 의견이 모두 반영되어지는 비교적 많은 시간과 비용을 투자하는 대상이 된다.

제노아 세일은 메인세일과 유사한 재질이며 면적 150㎡에 중량 50kg 정도이다. 제노아 세일을 부착하는 포스테이는 마스트 높이의 7/8의 높이를 갖는 전형적인 프렉셔널 리그(fractional rig)이며, 제노아 세일 자체는 풍속과 해상상태에 따라 각각 다르게 설계되어진 6가지 종류의 것을 미리 제작해 놓는다. 일반적으로 미풍에서 사용하는 제노아 세일은 비교적 깊은 캠버를 가지며, 최대의 양력을 낼 수 있도록 설계되어지고, 약한 바람에서도 원하는 캠버가 만들어질 수 있도록 가볍고 유연한 재질이 선택되어진다. 16노트 이상의 중풍 상태에서 채택되는 제노아 세일은 캠버가 작은 편평한 형상을 가



지고, 비교적 많은 양의 탄소섬유를 사용하여 바람에 의해 늘어나는 특성을 최소로 하여 언제나 같은 캠버형상을 가질 수 있도록 제작되어진다. 20노트 이상의 강풍에서는 더욱 평편한 형상의 세일을 사용하게 되며 전체적인 세일 면적도 줄여주어 풍압에 의한 횡경사를 줄여주도록 구성한다. 제노아 세일의 제작 역시 메인 세일의 제작방법과 동일하다. 풍하 방향으로의 범주 시에는 스피네이커 또는 제네커 세일을 사용한다. 스피네이커 세일은 좌우 대칭으로 만들어진 매우 풍성한 캠버를 가지는 세일로서 보통 15노트 이상의 바람에서 사용하게 된다. 제네커는 비교적 약한 바람에서, 특히 바람과의 각도가 완전 풍하향이 아닌, 작은 각도의 풍하향에서 사용하게 되며, 리치(leech)보다 러프(luff)의 길이가 긴 비대칭형의 세일이다. 제노아 세일과 마찬가지로 바람의 세기와 수면의 거칠기에 따라 몇 가지 종류를 준비하게 되며, 폴리에스터 또는 나일론 재질로 된 홀겹의 매우 얇은 천을 사용하며, 평방미터당 40그램 정도의 중량을 가져 전체 500 m² 이상의 넓이에도 불구하고 25 kg 정도가 된다.

아메리카스컵 대회의 경기정에서는 전체적으로 세일과 리그 시스템을 풍상향에 최적화시켜 설계하게 되는데 세일의 효율에 의한 속도 최대화와 바람을 거슬러 올라가는 각도를 최소화하기 위한 설계로 이루어진다. 즉, 매우 우수한 풍상범주가 되도록 만들어져 있으며, 10노트 정도의 바람이라면 35도까지 풍상향이 가능하고 이때의 선속이 9노트 이상일 정도로 최적화되어 있다. 이런 결과를 위해서는 CFD, FEM 연동 해석과 더불어 풍동을 이용한 모형시험이 필수적인 절차가 된다(Fig. 22).

5. 최근의 연구동향

가장 최근의 연구들은 선형이나 부가물보다는 주로 세일에 대한 해석이 주를 이루고 있다. 이러한 이유는 선형이나 부가물에 대한 연구가 불필요하다기 보다는 이미 최적화된 부분이 상당히 존재하기 때문이며, 반면 세일에 대한 연구가 더 효과적이기

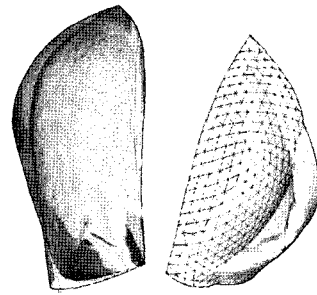


Fig. 21 Deformation and collapse simulation of spinnaker sail (CFD-FEM)

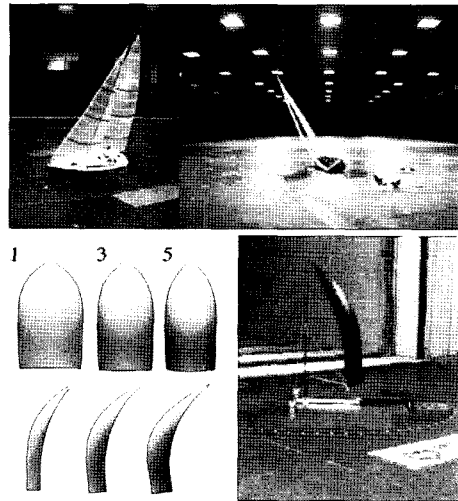


Fig. 22 Wind tunnel tests for various spinnaker sails

때문이다. 2002년에 뉴질랜드에서 개최되었던 첫 번째 HPYD 학회에서는 VPP 및 PPP 프로그램에 대한 신뢰성 향상과 저항성능의 향상을 위한 선형과 벌브 길에 대한 수치 시뮬레이션이 중심적인 내용이었던 반면에, 2006년에 있었던 두 번째 HPYD에서는 더욱 복잡하고 해석하기 어려운 풍하향 세일 시스템에 대한 연구를 포함하여 유체-구조 연동 해석을 통한 세일의 변형 및 형상붕괴에 대한 비선형 해석이 소개되어진 바 있다. 특히, 2006~2007년 볼보레이스의 새로운 규정으로 인해 부착이 허용되어진 캔팅킬에 대한 집중적인 연구와 실제 제작되어 부착되어진 캔팅킬 구동 시스템에 대한 실물이 선보이기도 하였다. 유체역학적인 관점에서 보면, 세

일의 효율 향상을 위한 양력 극대화에 대한 형상 최적화의 단계를 벗어나 실제 범주 중인 세일러들이 세일과 선체를 조절할 때 나타나는 문제를 시뮬레이션하고 최적 조건으로 조절방법을 제시하는 단계로 발전해나가고 있는 것이다. 최근 들어 선박분야 외의 자동차, 항공분야에서 많은 연구가 수행되어지고 있는 탄소섬유 등의 신소재를 이용한 선체와 각종 리그의 신뢰성에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있는 상황이다.

실험 계측 분야에서는 모형선을 벗어나 실선 자체의 세일에 대한 동압력을 계측하려는 시도가 보이고 있으며, 이탈리아와 뉴질랜드에서는 고성능 요

트 설계를 위하여 이중의 계측구간을 가지고 3차원 유입풍(twisted onset flow)을 형성시킬 수 있는 풍동이 설립되기도 하였다(Fig. 23, 24). 또한 데이터 베이스에 의한 설계기법과 함께 디지털생산기법의 하나인 PLM(product lifecycle management)에 의한 레저선박 설계-생산 시스템에 대한 소개도 보였으며, 다국적 컨소시엄에 의한 최첨단 선박 개발 프로젝트가 소개되기도 하였다.

6. 결 언

현재 우리나라는 조선 생산량 1위국으로서 그와 관련한 기반기술과 요소기술 그리고 설계와 생산에

Table 3. Papers on HPYD (Dec. 2002)

1. CFD investigations and design integration for IACC yachts	2. Comparison of wind tunnel and full-scale aerodynamic sail force measurements
3. RANSE simulations for sailing yachts including dynamic sinkage & trim and unsteady motions in waves	4. Wind Tunnel Testing of Downwind Sails
5. An advanced finite element method for fluid dynamic analysis of Americas Cup boats	6. Enhanced depowering model for offwind sails
7. Numerical and experimental aeroelastic analysis of sails	8. Achieving high performance within the restrictions of EU recreational craft directive
9. Validation of CFD methods for downwind sail design	10. Regulatory constraints on the structural design of high performance yachts
11. Improving the design of sails using CFD and optimization algorithms	12. Advanced parametric yacht design
13. Accuracy in sail simulation: Growing fast sails	14. Yacht optimisation based on genetic algorithm using RANSE solver
15. Tank testing and data analysis techniques for the assessment of sailboat hydrodynamic characteristics	16. Implementation, application and validation of the Zarnick strip theory analysis technique for planing boats
17. The accuracy and repeatability of tank testing, from experience of ACC yacht development	18. Yacht performance prediction: towards a numerical VPP
19. The rig of the research sailing yacht "DYNA"; measurements of forces and FEA	20. Development of a more realistic sailing dinghy simulator
21. Finite element analysis of composite boats	22. Computerized Sail Trimming for Wind Tunnel Testing
23. Web buckling of solid composite stiffeners	24. The effect of water depth on the performance of high speed craft
25. Working load to break load: Safety factors in composite yacht structures	26. The effect of pitch radius of gyration on sailing yacht performance
27. Non-destructive inspection of marine composite structures	28. VPP vs PPP: challenges in the time-domain prediction of sailing yacht performance
29. Measurement of wake crossing motions and loads	30. Rudder span effects on IMS hydrodynamic induced drag
31. Utility of flying shapes in the development of offwind sail design databases	



관련된 훌륭한 인프라를 충분히 갖추고 있다. 그러나 세계 조선시장 중 대형조선산업은 삼분의 일 (약 300억불, 2002년 현재)을 차지하고 있을 뿐이며, 우리나라의 점유율은 그 중의 반을 넘지 못하는 형편

Table 4 Papers on HPYD II (Feb. 2006)

1. Experimental research of sailing craft added masses for hull-keel combinations by acceleration tank tests	2. Practical Aspects of Design, Construction and Analysis of Canting Keels
3. High performance large yacht construction using product data models	4. Designing composite structures for slamming loads
5. The performance of controllability of yachts sailing downwind in waves	6. Numerical investigation on the effects of trim for yacht rig
7. An Investigation of Aerodynamic Force Modelling for Yacht Sails using Wind Tunnel Techniques	8. Safety considerations in developing the stability and structural requirements in Volvo Open 70 Rule
9. RANSE investigations of downwind sails and integration into sailing yacht design processes	10. The use of independent supports and semi-rigid sails in wind tunnel studies
11. Added Resistance in Short Reflected Waves-Sailing Hull	12. CFD Calculations on the sail-like three dimensional airfoils
13. Investigation of the performance of a spinnaker with different appendages-wind tunnel test and numerical simulation	14. Experimental Considerations Concerning Pressure measurements on sails in the wind tunnel and in full-scale
15. Knowledge based engineering and innovative yacht design	16. Motion Prediction of Ships and Yachts by smoothed particle hydrodynamics
17. A CFD validation test case-wind tunnel tests of a winglet keel	18. Practical Aspects of Canting Keel Design, Construction and Analysis
19. Sink or swing: the fundamentals of canting keel structures	20. The Challenging Turbulent Flows Past Downwind Yacht Sails and Practical Application of CFD to Them
21. Design Process Automation for Sailing Yachts	22. Wind Tunnel Techniques for Investigation and Optimization of Sailing Yachts Aerodynamics
23. Full scale investigation of one-design class catamaran sails	24. Sailboat Design by Response Surface Optimization
25. Experimental analysis of the vertical motions in waves of an IACC yacht with calm water-optimized bulb shapes	26. Cost and Energy Assessment of a High Speed Ship
27. Optimal rig design using mathematical programming	

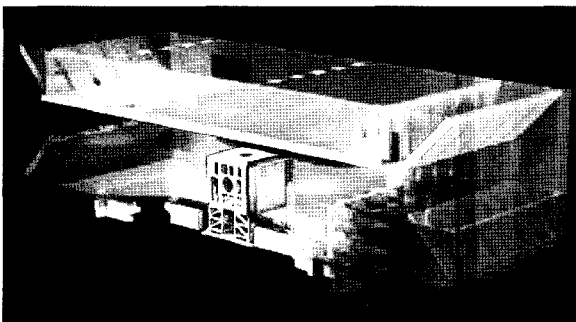


Fig. 23 Politecnico di Milano wind tunnel (55m/s with 4m × 4m lower test section, 15m/s with 14m × 4m upper test section Milano, Italia, 2001)

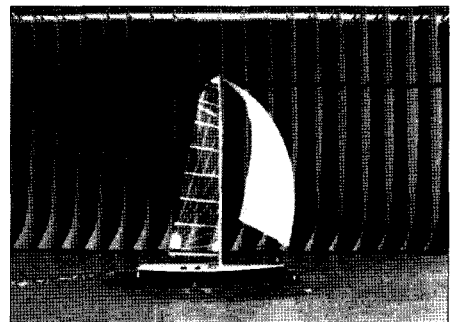



Fig. 24 Twisted flow wind tunnel (8.5m/s in 7.0 × 3.5m for low speed testing, 16m/s in 3.5 × 3.5m for high speed testing Auckland University, New Zealand, 1994)

이다. 더욱이 소수의 대형 조선소가 조선 매출의 80% 이상을 차지할 정도로 산업 불균형이 심각하다. 이에 반해 소형 선박, 특히 레저선박 관련한 시장규모는 약 220억불 정도로서 대형조선산업에 비해 결코 작은 시장이 아니다. 향후 균형 있는 지역발전을 위한 성장 동력으로서, 또한 진정한 의미의 조선해양 강국을 달성하기 위해서는 이러한 또 다른 대규모 조선시장이 존재하고 있음을 주지해야 할 것이며,

이와 관련한 연구 개발과 더불어 적극적인 투자가 하루 빨리 선행되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. HPYD conference, 2002, New Zealand
2. HPYD II Conference, 2006, New Zealand
3. <http://www.alinghi.com/>
4. <http://bmworaccleracing.com/>
5. <http://www.americascupnews.com/> 

유 재 훈 | 한국해양연구원 해양시스템안전연구원



- 1964년생
- 1996년 서울대학교 조선해양공학과 박사
- 관심분야: 실험유체역학, 선박설계 및 성능 해석, 세일링요트 및 레저보트 설계 및 성능해석
- 연락처: 042-868-7249
- E-mail: jhyoo@moeri.re.kr

안 해 성 | 한국해양연구원 해양시스템안전연구원



- 1969년생
- 2002년 서울대학교 조선해양공학과 박사
- 관심분야: 예인수조모형시험, 실험유체역학, 선박성능해석
- 연락처: 042-868-7243
- E-mail: hsahn@moeri.re.kr

박 철 수 | 한국해양연구원 해양시스템안전연구원



- 1971년생
- 2003년 서울대학교 조선해양공학과 박사
- 관심분야: 함정특수성능
- 연락처: 042-868-7687
- E-mail: parkcs@moeri.re.kr

이 영 연 | 한국해양연구원 해양시스템안전연구원



- 1975년생
- 2001년 포항공과대학교 기계공학과
- 관심분야: 선박유체역학, 예인수조모형시험
- 연락처: 042-868-7252
- E-mail: yylee@moeri.re.kr

반 석 호 | 한국해양연구원 해양시스템안전연구원



- 1956년생
- 1986년 서울대학교 조선공학과 박사
- 관심분야: 실험유체역학, 전산유체역학, 선박성능해석
- 연락처: 042-868-7242
- E-mail: shvan@moeri.re.kr