

工學碩士 學位論文

요트 킬의 형상에 따른 유체력 및
유동 특성 변화 연구

Research of Hydrodynamic Force and Fluid Flow Characteristics
Change due to Shape Change of Yacht Keel

指導教授 玄 汎 洙

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋 시스템 工學科

崔 基 哲

목 차

Abstract	III
Nomenclature	IV
List of Figures	V
List of Tables	VI
1. 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 세일링 요트의 개요	3
1.2.1 세일링 요트의 정의	3
1.2.2 세일링 요트의 분류	4
1.2.3 세일링 요트에 미치는 힘과 기하학	6
2. 실험대상 모형 및 실험장치	8
2.1 실험대상 모형	8
2.2 실험장치	12
3. 선체와 킬의 상관관계 실험	12
3.1 저항시험	12
3.2 횡경사-사향시험	14
3.3 킬 단독 시험	18
3.4 PIV 실험	21
3.4.1 PIV 원리	21
3.4.2 계측부 조명 및 영상 촬영	22
3.4.3 PIV 계측 결과	23

4. 길의 형상에 따른 성능 평가	26
4.1 저항시험을 통한 길 형상별 비교	26
4.2 길 단독시험을 통한 길 형상별 비교	27
4.3 PIV 실험을 통한 길 형상별 비교	28
5. 결 론	38
참고문헌	39

Abstract

In this research measuring resistance of sailing yacht, side Force and yaw Moment using resistance test, force measuring test at various combinations of heeling and leeway angles & Keel test when Keel attached and wasn't attached on the bottom of hull part. When sailing yacht is upright condition, measuring difference of side force when keel attached and wasn't attached on the bottom of hull part and comparing Keel's side force measured by Keel test. From this result searching correlation between hull and Keel. And case that leeway angle is 10° and heeling angle 20° , measuring flow of wake by PIV(particle Image Velocimetry) method when Keel attached on the bottom of hull part and Keel is alone in order to verify whether ignore of correlation between hull and Keel is possible when there is leeway angle and heel angle as well as sailing yacht is upright condition. From these results gaining conclusion of ignore of correlation between hull and Keel is possible. Therefore researching Hydrodynamic Force and Fluid Flow Characteristics change of 3 types of Keel using PIV(particle Image Velocimetry) method and Keel test. 3 types of Keel were Fin Keel, Bulb Keel, Winglet Keel

Nomenclatures

x	:	coordinate axis
y	:	coordinate axis
z	:	coordinate axis
β	:	angle of leeway
ϕ	:	angle of Heeling
ν	:	kinematic viscosity
C	:	wing chord
k	:	turbulent kinetic energy
ω	:	vorticity
Re	:	Reynolds number, $Re = U_{\infty}C/\nu$
Y	:	Side force
N	:	Yaw moment
C_S	:	Side force coefficient
C_N	:	Yaw moment coefficient

List of Figures

Fig. 1 Sailing Yacht Configuration	3
Fig. 2 Kinds of Sailing Yacht in each Sail Type	4
Fig. 3 Kinds of Sailing Yacht in each Keel Type	5
Fig. 4 Equilibrium of Force & Moment in State Sailing Condition	8
Fig. 5 Model Ship of Sailing Yacht	10
Fig. 6 Bulb & Winglet	10
Fig. 7 Shape of Keel	11
Fig. 8 Circulating Water Channel	12
Fig. 9 Results of Resistance Test	14
Fig. 10 Coordinate system	15
Fig. 11 Results of Heeling and Leeway Test (Side Force C_S)	17
Fig. 12 Result of Heeling and Leeway Test (Yaw Moment C_N)	18
Fig. 13 Keel Test Apparatus	18
Fig. 14 Results of Keel Test	20
Fig. 15 comparison of Heeling - Leeway test & Keel test	20
Fig. 16 PIV Principle	21
Fig. 17 PIV System	22
Fig. 18 Schematic of Experiment	23
Fig. 19 PIV result of Yacht Hull & Keel interaction	25
Fig. 20 Result of Resistance Test (Three Different Types of Keel)	27
Fig. 21 Results of Keel Test (Three Different Types of Keel)	28
Fig. 22 Velocity vectors($\beta=10^\circ$)	30
Fig. 23 Vorticity($\beta=10^\circ$)	31
Fig. 24 Reynolds Energy Stress($\beta=10^\circ$)	32
Fig. 25 Turbulent Kinetic Energy($\beta=10^\circ$)	33
Fig. 26 Velocity vectors($\beta=20^\circ$)	34
Fig. 27 Vorticity($\beta=20^\circ$)	35
Fig. 28 Reynolds Energy Stress($\beta=20^\circ$)	36
Fig. 29 Turbulent Kinetic Energy($\beta=20^\circ$)	37

List of Tables

Table 1 Equilibrium of Force & Moment in state Sailing Condition	7
Table 2 Principal Particulars Model & Actual Ship	9
Table 3 Principal Particulars of Keel	9
Table 4 Resistance Test Condition	13
Table 5 Keel & Test Condition	19

1. 서론

1.1 연구배경

최근에 우리나라에서도 주 5일제 근무의 도입과 국민소득의 증대 등으로 해양 레저에 대한 관심이 급속히 늘어나고 있다. 그러나 해양레저장비와 관련된 국내 기술은 초보 단계이며, 해양레저의 핵심이라 할 수 있는 세일링 요트의 경우, 그 장비의 대부분을 수입에 의존할 뿐 아니라, 세일링 요트에 관한 연구도 선진 외국과 비교했을 때 활발하지 않은 실정이었다. 그러나 최근에는 연구소와 대학을 중심으로 요트의 선형 개발과 요트의 추진과 관계 있는 세일에 대한 연구 등이 활발히 진행되고 있고, 세일링 요트에 대한 더 많은 연구들이 계속 되리라 예상된다.

세일링 요트는 일반 선박이 프로펠러를 이용하여 추력을 발생시키는 것과는 달리 풍력이 세일을 통하여 추력을 발생시키므로 이에 반하는 반작용으로 선체가 횡경사(Heeling)와 사항(Leeway)되어 추진하게 된다. 따라서 세일링 요트의 추진 성능에 대한 연구는 이들 횡경사와 사항을 고려하여야 한다. 이에 세일링 요트의 선형 시험은 직립 직진 상태에서 실시하는 일반 선박과는 다른 기법이 정립되어야 한다. 그리고 횡경사(Heeling)와 사항(Leeway)시에 요트의 Balance 유지와 횡류를 방지하기 위해 요트 Hull의 하부에 Keel을 필요로 한다. 킨(Keel)은 날개 형상으로서 NACA 계열의 단면을 많이 사용하고 있고, 요트의 사항(Leeway) 시에 수면 하 킨(Keel)과 선체(Hull)에 작용하는 횡방향의 힘(Side Force)가 세일에 작용하는 풍력에 의한 횡방향의 힘과 힘의 균형을 이루어 요트가 진행하게 된다. 특히 킨은 안정성과 추력에 상당한 영향을 미치기 때문에 적절한 킨의 선택은 중요하다고 할 수 있다. 이 킨의 형상에 따라 요트의 추진 성능 등이 달라진다. 이에 따라 선진 외국의 경우 아메리카 컵에 출전하는 세일링 요트의 선형개발과 관련된 연구가 활발히 진행되어 왔다. 세일링 요트의 선형시험은 1903년 제 12회 아메리칸컵 레이스에 출전한 Shamrock

Ⅲ의 실험에서 직립 시와 횡경사시의 저항 계측으로부터 시작되었고, 그 이후 횡경사와 사향을 동시에 고려한 시험기법이 개발되기도 하였다. Davison (1936)은 Stevens 공과대학에서 세일링 요트의 풍상 항해시 성능 추정을 하였고, 1937년에 행해진 제 16회 아메리칸 컵 레이스에서의 선형설계에 활용하여 성공함으로써 세일링 요트 설계에 대한 수조시험의 유용성을 입증하였다. 그 후 Kirkman/Pedrick(1974)은 Davidson에 의해 개발되어진 세일링 요트의 축적 비에 대한 전저항 계수를 비교하여 모형선의 크기에 따라 저항계수의 차이가 있음을 분석하고 모형선 축적비가 작은 큰 모형선이 실선과 잘 일치됨을 주장하였다. 한편 Greeley & Cross-Whiter(1989)가 수치해석과 실험결과를 비교하여 Keel의 유체역학적인 거동에 영향을 주는 물리적인 변수를 고려하여 요트 Keel의 성능을 다양한 킬의 형상에 따라 비교 연구하였고, Flay & McMillan(1993)은 풍동과 예인수조에서의 실험을 통해 다양한 킬의 종횡비 (Aspect ratios)와 횡경사 각에 따른 양력과 항력을 계측하고, 이를 Nomoto(1978), Gerritsma (1981) 등이 제안한 이론식들과 비교하여 분석하는 등 킬의 형상에 따른 성능 추정을 많이 연구하였다.

이에 따라 본 연구에서는 저항시험과 횡경사-사향시험을 킬이 선체 하부에 있는 경우와 없는 경우의 실험을 수행하고, 이 결과를 비교하여 킬이 요트의 유체력과 유동 특성에 어떤 영향을 미치는지를 알아본다. 그리고 횡경사-사향 시험에서, 킬이 선체 하부에 있을 경우의 횡방향의 힘과 킬이 선체 하부에 없을 경우의 횡방향의 힘의 차가 순수한 킬에 작용하는 횡방향의 힘으로 가정하여 이를 킬 단독 시험을 통한 킬 단독의 횡방향의 힘과 비교하여 요트 선체와 킬의 상관관계를 알아보았다. 그리고 PIV 실험을 통한 유동 현상을 비교하여 선체와 킬의 상관관계를 확인하여보았다. 이 비교 결과들로부터 킬과 선체 간의 상호 작용이 무시할 만 하다면 킬만을 단독으로 하여 형상을 변화시켜서 킬의 형상에 의한 유체력과 유동 특성의 비교를 PIV실험과 킬 단독 시험을 통해 알아본다.

1.2. 세일링 요트의 개요

1.2.1 세일링 요트의 정의

요트는 추진기를 갖추고 있는 동력 요트와 돛을 갖추고 있는 세일링 요트로 구분한다. 세일링 요트는 바람의 방향에 따라 돛을 이용해서 추진하는 무동력

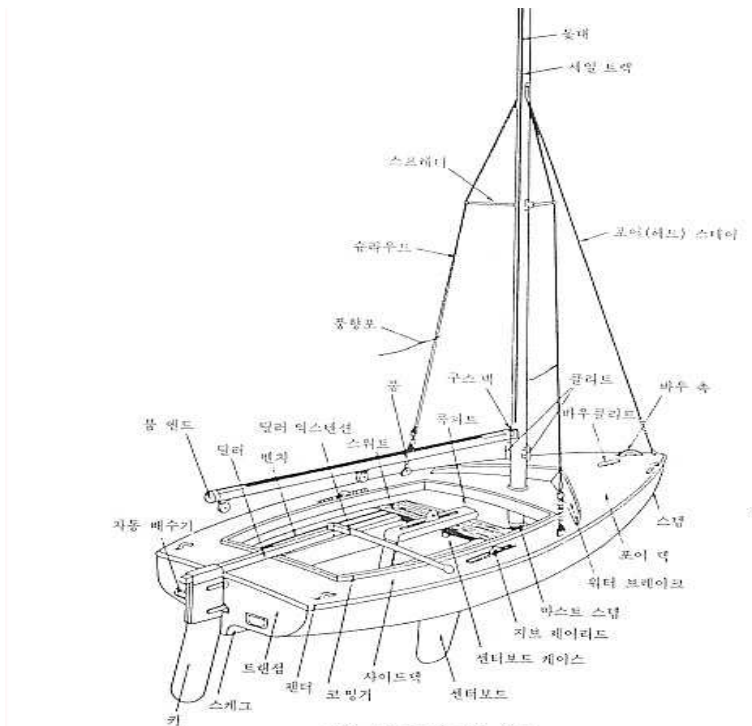


Fig.1 Sailing Yacht Configuration

보트이다. 보통 요트라고 하면 돛을 달고 있는 세일링 요트를 일컫는다.

세일링 요트는 여러 가지로 분류가 되는데 용도에 따라서는 주로 연안이나 내수면에서 경기를 하기 위한 범주정으로 선실이 없는 소형 요트 클래스인 딩기(Dinghy)가 있고, 외양의 넓은 지역에서 장거리 코스를 향해하며 최소 24ft 이상 대형이고 선실이 있는 크루저(Cruiser)급으로 나눌 수 있다. Fig.1은 세일링 요트의 각부 명칭을 나타낸 것이다.

1.2.2 세일링 요트의 분류

세일링 요트는 돛대의 위치, 돛의 형태, 킬의 형상 등 매우 다양한 방법으로 분류하고 있다. 여기서는 유체역학적으로 관심이 큰 세일에 의한 분류와 킬(횡류방지 장치)에 의한 분류로 나누어 소개한다.

(1) 세일에 의한 분류

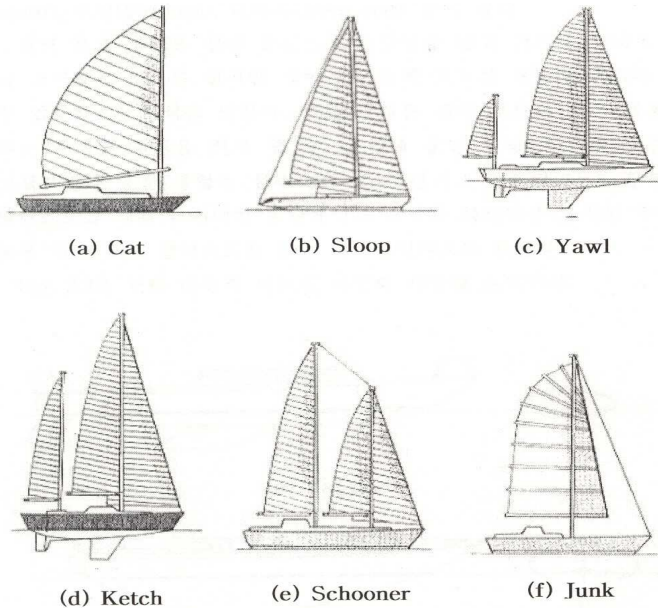


Fig.2 Kinds of Sailing Yacht in each Sail Type

세일링 요트는 풍력과 세일에 의해 발생된 추진력으로 진행하므로 세일의 양식이 매우 중요하다. 요트는 세일의 종류에 따라 Fig.2와 같이 분류된다.

캐트 타입은 주로 딩기 클래스에 많이 분포되어 있으며, 한 개의 마스트에 한 장의 세일로 되어 있어 조종이 간단하고 빠른 속력을 낼 수 있어서 소형 경주용으로 사용된다. 슬루프 타입은 가장 일반적인 형태로서 마스트 하나에 메인 세일 한 장, 집(Jib) 세일 하나를 갖춘 요트로서 속도가 빠르고 선회성이 좋으며 가장 좋은 레이스 클래스로 분류된다. 올 타입은 속도보다 조종성을 중시하여 외양의 큰 파랑 가운데서 항주하기 좋게 만든 형이다. 따라서 선체도 크고

보통 2개의 마스트를 가지고 있고, 선미 가까운 미즌 세일(Mizzen sail)은 메인세일에 비해 아주 작은 것이 특징이다. 케치 타입은 울의 장점을 취한 것으로 미즌 세일의 돛 면적을 크게 하고 마스트의 위치도 앞쪽에 두었다는 것이 울과의 다른 점이다. 스쿠너 타입은 일반적으로 2개의 마스트를 가졌다. 이 Type은 울과 캐치의 장점을 취한 것이다. 정크 Type은 범선과 유사한 형태로 돛의 수를 최소화하여 매우 단순하며, 연안 항해 레저에 주로 사용한다.

(2) 횡류 방지 장치에 의한 분류

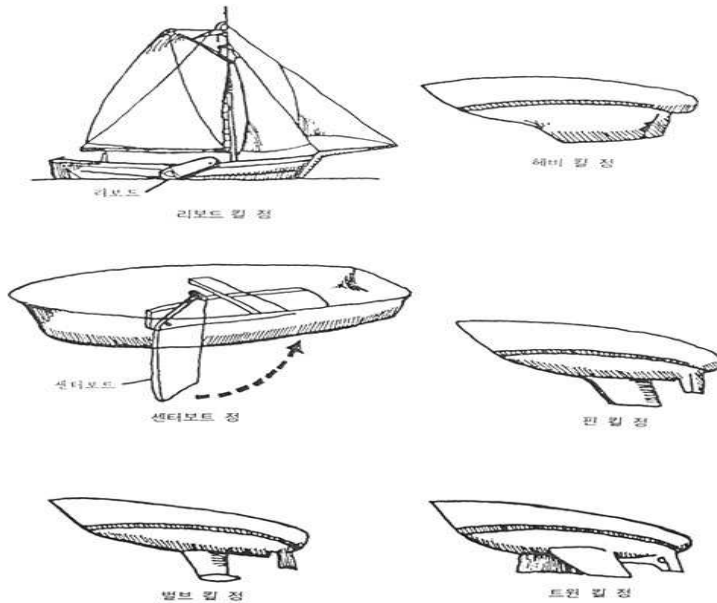


Fig.3 Kinds of Sailing Yacht in each Keel Type

Fig.3의 리보드 정은 초기의 요트로서 요트가 조류나 바람에 횡쪽으로 밀리는 것을 막는 것으로 저항판인 리보드를 양현에 설치하여 바람이 불어가는 쪽 (leeward)의 리보드를 물 속에 내려서 횡류를 방지한다. 센터보드는 용골 (Keel)이 횡방향으로의 저항을 받지 않는 형의 배에 선체 중앙의 수면 아래쪽으로 내려져 있어 횡방향으로 저항을 생기게 하는 것으로 일반적으로 널빤지 모양이며, 덩기정에서 가장 많이 볼 수 있고 물 속으로 내렸다 올렸다 할 수 있다. 즉 리보드를 선체 중앙으로 옮겨놓은 것이다. 헤비킬정은 무게 중심을 낮추고 복원력을 갖게 하기 위해서 선체의 킬 자체가 깊고 긴 저항체를 하고 있

는 형태로서 그 하부에 하나의 밸러스트(Ballast) 역할을 하고 있는데, 이를 딥 킬이라고도 한다. 이는 일반적으로 크루저에서 많이 볼 수 있는 형태로서 그 특징은 선체와 밸러스트가 단일 구조가 되어 있어 강도면에서 우수하지만 나무로 만든 킬 정 외에는 킬을 깊게하는 추세로 가고 있어 거의 쓰이지 않는다. 핀 킬(Fin Keel)은 이번 실험에서의 표준형으로서 배의 경량화나 재질적 변화에 의해 대형 요트에서도 평면적 선저를 많이 사용하고 있어 밸러스트를 겸용한 핀이라는 저항체를 선체 아래에 물 속 방향으로 설치한 형태로 금속체 중량물이다. 벌브 킬은 핀 자체를 밸러스트로 구성하고 핀은 얇은 판의 형태이며 핀 하부에 포탄 모양의 벌브를 붙인 일종의 핀 킬의 변형으로 소형이나 중형 크루저 등에 쓰인다. 트윈 킬은 핀 킬의 변형이지만 킬의 길이를 작게 하여 선체를 육지 가까이에 접안할 수 있도록 핀을 선체 중앙에 양현 선저 아래쪽으로 비스듬하게 두 개를 설치한 것이다. 롱 킬정은 디프킬과 같은 것으로 킬 자체가 저항체를 형성하는 서양 범선의 전형적인 선형으로 크루저의 경우 경기정에서 많이 사용된다.

본 논문에서는 핀 킬(Fin Keel)과 벌브를 부착한 벌브 킬(Bulb Keel), 그리고 여기서 소개되지 않은 Winglet을 부착한 윙렛 킬(Winglet Keel)을 실험대상으로 킬의 형상에 따른 유체력 및 유동 특성을 비교해 볼 것이다.

1.2.3 세일링 요트에 미치는 힘과 기하학

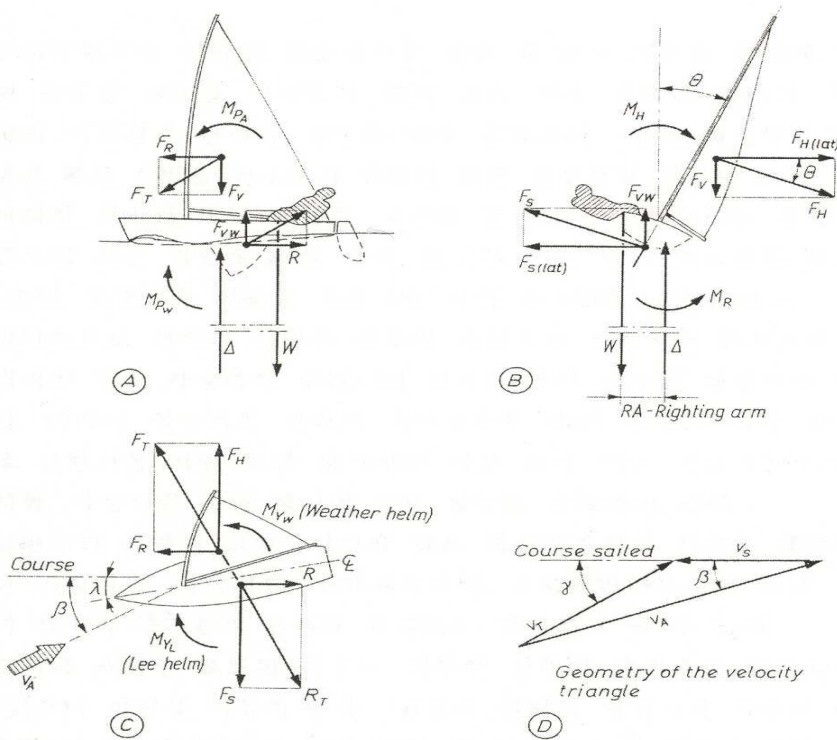
세일링 요트는 풍력에 의해 추진됨으로 세일에 발생하는 힘의 작용점과 모멘트와 수중에 잠긴 세일링 요트의 선체와 Keel에 발생하는 힘의 작용점과 모멘트가 각각 공기 중과 수중의 위치에 존재하게 된다. 즉, 공기 중에서의 추진력, 횡경사 힘, 수직 공기 힘과 트림 모멘트, 횡경사 모멘트, 요잉 모멘트가 발생하고, 수중에서는 선체저항, 횡경사 힘, 수직 수중 힘과 트림 모멘트, 복원 모멘트, 요잉 모멘트가 발생한다.

Table 1 Equilibrium of Force & Moment in state Sailing Condition

Air		Water	
Symbol	Description	Symbol	Description
F_R	Driving force	R	Water Resistance
F_{Hlat}	Horizontal heeling force	F_{Slat}	Horizontal heeling force
F_V	Vertical aerodynamic force	F_{VW}	Vertical hydrodynamic force
M_{PA}	Trimming moment	M_{PW}	Trimming moment
M_H	Heeling moment	M_R	Righting moment
M_{YW}	Yawing moment	M_{YL}	Yawing moment

세일링 요트의 추진은 이러한 공기 중의 힘과 모멘트, 수중의 힘과 모멘트의 평형에 의해 이루어진다. Table 1은 Marchaj(1979)의 힘과 모멘트의 기호를 나타내었고, Fig.4는 Marchaj(1979)의 힘과 모멘트의 평형을 나타낸 그림이다.

본 논문에서는 F_{Hlat} , F_{Slat} 라고 표기되어 있는 횡방향의 힘(Side Force)라고도 하는 Horizontal heeling force와 Yawing moment를 횡경사-사향시험을 이용하여 선체에 킬이 있을 경우와 선체만 있을 경우의 힘을 측정하였고, 선체에 킬이 있을 경우의 횡방향의 힘에서 선체만 있을 경우의 횡방향의 힘을 킬 단독 실험을 통해서 얻은 킬만의 횡방향의 힘을 측정하여 비교하여 보았다. 그리고 이 결과가 비슷하다면 PIV 실험과 핀 킬과 벌브 킬, 윙렛 킬의 3가지 형태의 킬에 의한 유체력 및 유동 특성 변화를 연구할 것이다.



Where, W : Weight of the boat
 Δ : Displacement of the boat

Fig.4 Equilibrium of Force & Moment in State Sailing Condition

2. 실험대상 모형 및 실험장치

2.1 실험대상 모형

본 연구에 사용한 모형선은 31피트급 크루저 세일링 요트의 모형으로써 선형은 박종현 등(2004)이 우리나라 전통 돛배의 선형을 기초로 개발한 선형을 대상으로 하였다. Table 2은 모형선과 실선의 제원이 나와 있으며 Fig. 5은 대상 모형선의 사진이다. Table 3은 길에 대한 제원을 나타냈다.

Table 2. Principal Particulars Model & Actual Ship

구분		Model ship	Actual ship
LBP		1m	8.186m
Breadth		0.428m	3.500m
Depth(Max)		0.172m	1.411m
Draft	from B.L	0.054m	0.439m
	from Keel bottom	0.213m	1.740m
Disp. (Δ)	without Appendage	0.008075m ³	4.54t
	with Appendage	0.00848m ³	4.768t
wetted surface	without Appendage	0.2684m ²	17.988m ²
	with Appendage	0.33135m ²	22.204m ²
KG	from Base Line	0.062m	0.504m

Table 3. Principal Particulars of Keel

구분	Model
Chord (upper)	0.1339m
Chord (bottom)	0.1158m
Span	0.1623m
Area	0.0229m ²
Aspect ratio	1.145
Maximum of sectional thickness	0.0197m

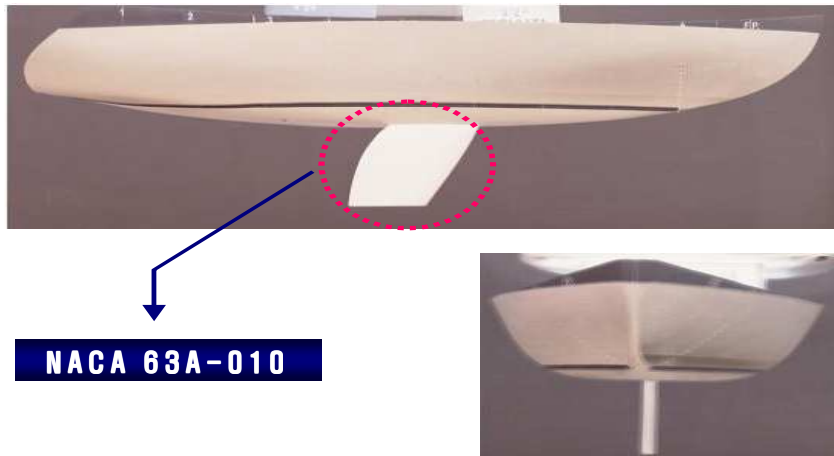
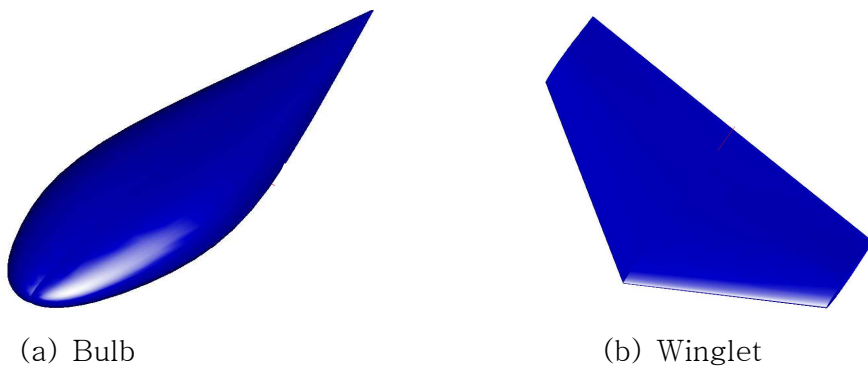


Fig. 5 Model Ship of Sailing Yacht



(a) Bulb

(b) Winglet

Fig. 6 Bulb & Winglet

Fig.6은 이번 실험에서 핀 킬에 부착한 벌브와 윙렛의 개략도이다. 벌브는 정면에서 장축이 타원형이고, 길이가 14cm이고 형상은 Greeley(1989)의 벌브형상의 수식을 이용하여 설계하였다.

$$(y/a)^\alpha + (z/b)^\alpha = 1 \quad (1)$$

y=vertical distance from center bulb

a=maximum vertical radius

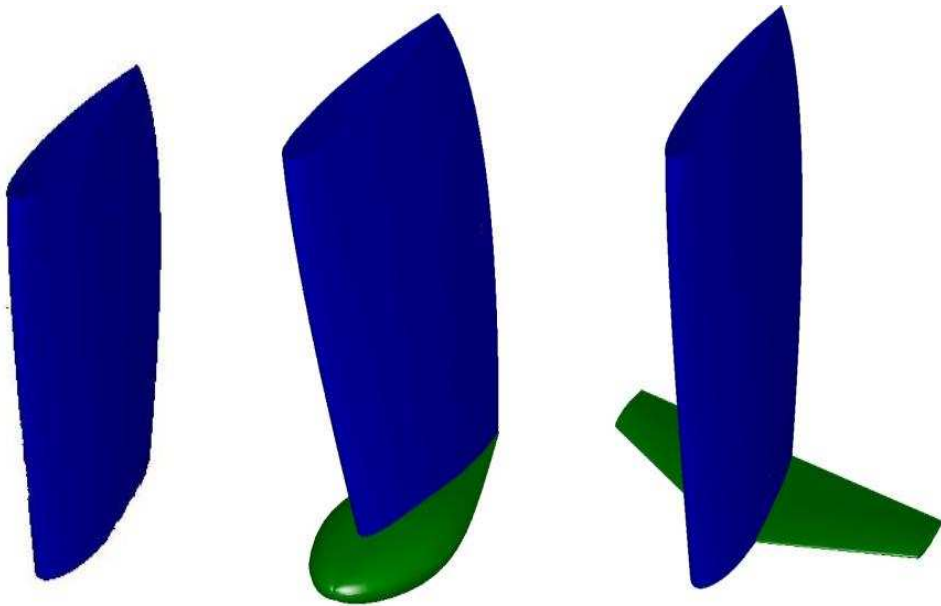
z=horizontal distance from center of bulb

b=maximum horizontal radius

a=exponent

이번 실험의 벌브의 수직 반경의 최대 길이 a는 2cm이고, 수평 반경의 최대길이 b는 4.5cm이고 수식에서의 지수 a는 Bulb 의 nose~ midsection까지는 2이고 midsection~tail까지는 4를 적용하였다.

윙렛은 Tip의 chord 방향으로 Tip 길이의 60%인 6.7cm 이고, Tip의 두께 방향으로의 길이는 14cm이고, 두께는 2mm, 후퇴각은 20°이다.



(a) Fin Keel

(b) Bulb Keel

(c) Winglet Keel

Fig. 7 Shape of Keel

Fig.7은 이번 실험에서 사용된 3가지의 킨의 형상이고, (b) 벌브 킨은 1984년 아메리카컵에 출전한 America II에 부착된 킨을 참고하여 (a) 핀 킨에 부착하였고, (c) 윙렛 킨은 1987년 아메리카컵에 출전한 Australia II을 참고하여 제작하여 비교 실험을 수행하였다.

2.2 실험장치

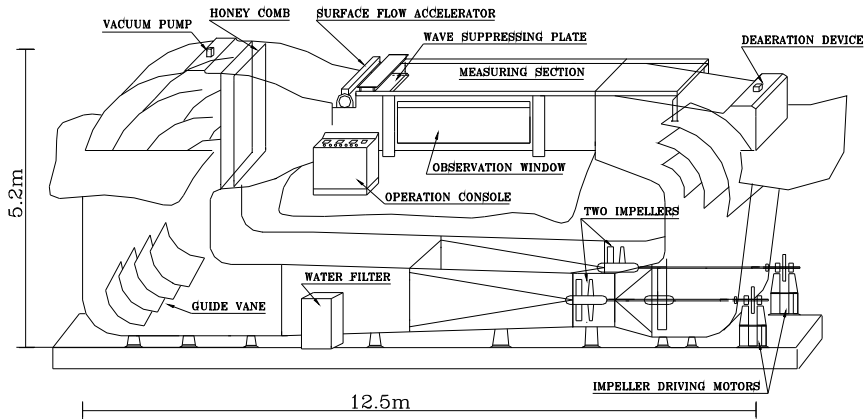


Fig. 8 Circulating Water Channel

본 논문의 실험은 Fig.8의 한국해양대학교 해양과학기술대학 회류수조 실험실에 설치되어 있는 회류수조(Circulating Water Channel)에서 수행하였다. 회류수조에서 유속의 발생은 2 Impeller Vertical Type(OV - 60B)을 이용하며, 수조 전체 크기는 길이 12.5m, 폭 2.2m, 높이 5.2m이며, 본 실험이 행해진 관측부의 크기는 길이 5.0m, 폭 1.8m, 높이 1.2m이다. 수조의 가동시 사용되는 물의 용량은 60ton이며 수조의 발생유속은 0.1m/s ~ 2.0m/s이다. 그리고 수조의 구동은 AC 22kw x 2set Impeller Motor로 구동된다.

3. 선체와 킬의 상관관계 실험

3.1 저항시험

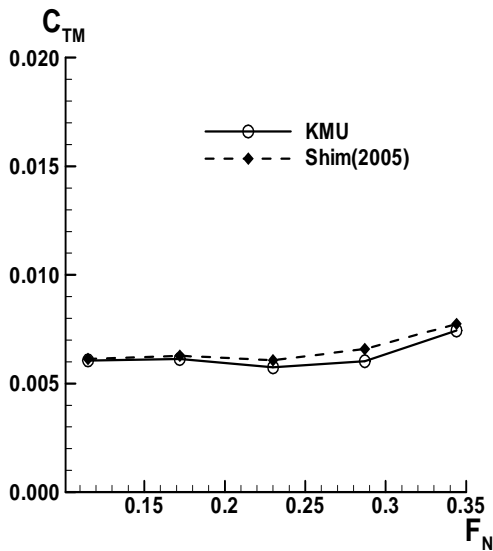
이 실험에서는 스트레인 게이지(strain gauze)식 로드셀(Load cell)을 이용하여 모형선이 받는 저항력을 계측하였다. 측정범위는 0~2kg까지 가능하다.

직립직진시의 저항시험은 선체만 있을 때와 킬을 부착했을 경우 2가지에 대하여 수행하였고, 횡경사나 사향이 없는 상태에서 Table 4와 같은 선속에서 실시하였다.

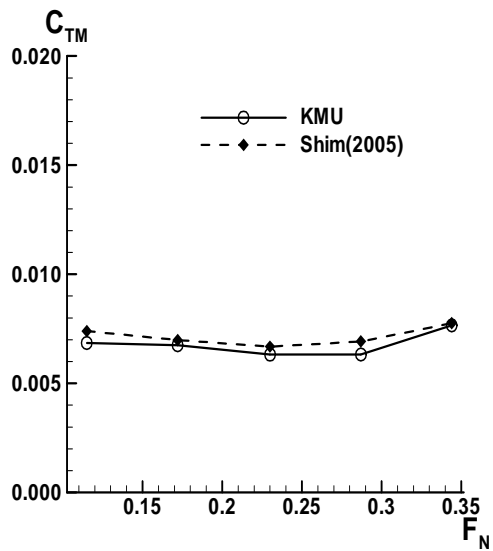
Table 4. Resistance Test Condition

F_n	0.115	0.172	0.230	0.287	0.345
V_m	0.360	0.539	0.719	0.899	1.079

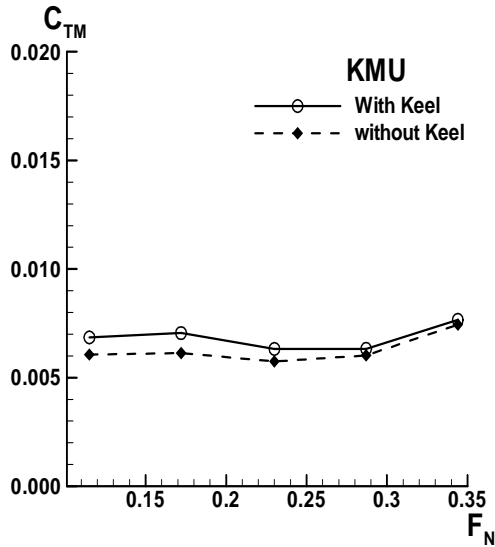
Fig.9(a)는 킬을 부착하였을 때와 부착하지 않았을 때 본 연구에서 수행한 저항시험결과를 보여주고 있다. KMU라는 것은 본 실험결과를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 직립상태에서의 킬의 영향을 보여주는데 높은 Froude수에서 거의 차이가 없는 반면 낮은 Froude 수에서는 약 10%의 차이를 보이고 있다. 이는 고속에서 킬로 인한 마찰저항이 상대적으로 작아지는 것에 기인한다고 생각할 수 있겠다. 한편 Fig. 9(b)와 (c)는 본 실험을 심상목 (2005)과 비교한 그래프로서 부가물을 부착했을 때와 부착하지 않았을 때 각 유속에서 2~10%정도의 차이를 보였다. 이는 본 실험이 심상목(2005)과 달리 부가물 중 타(Rudder)를 부착하지 않고 수행하였기 때문에 생기는 오차와 계측부의 유속분포 차이가 영향을 주었으리라 여겨지지만 정성적으로는 비슷한 경향을 보여 주었다.



(a) Without Keel (Comparison)



(b) With Keel (Comparison)



(c) With and Without Keel

Fig.9 Results of Resistance Test

3.2 횡경사-사항시험

본 실험을 하기 위해서 회류수조 실험실에 보유한 사항 시험기를 이용하였다. 이 장치는 선체에 작용하는 동유체력과 타에 작용하는 동유체력을 측정하는데 사용된다. 선체에 작용하는 횡방향 힘은 선수, 선미 두 곳에서, 선체가 받는 저항력은 선수에서 측정된다. 저항력은 ±1kg까지 계측이 가능하고 횡방향 힘도 선수 선미 각각 ±1kg까지 계측이 가능하다.

본 시험은 선체에 미치는 유체력을 측정하기 위하여 선체를 횡경사와 사항 시켜가면서 Y (전체 횡방향 힘)와 N (Yaw 모멘트)을 구하는 시험으로서 계측 속도는 0.719m/s이다. 선수, 선미에서 계측되는 동유체력 Y_F , Y_A 로부터 식(2)와 같이 Y와 N을 구하고

$$\begin{aligned}
 Y &= Y_F + Y_A \\
 N &= \ell \times (Y_F - Y_A) \quad (2)
 \end{aligned}$$

단, Y : 전체 횡방향의 힘(sway force)

N : 회두모멘트(Yaw moment)

l : Y_F, Y_A 측정위 사이의 거리

상기 Y, N을 식(3)와 같이 무차원하여 C_S 와 C_N 을 구한다.

$$C_S = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho L d V^2}$$
$$C_N = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho L^2 d V^2} \quad (3)$$

(L: 수선장, ρ : 물의 밀도, d: 흘수, V: 유속)

사향각은 직립($\phi=0^\circ$)일 경우는 좌우현으로 $0^\circ \sim 20^\circ$ 까지 5° 간격으로 실험을 수행하였다. 그리고 횡경사각(ϕ)이 10° 와 20° 일 때는 좌우현 대칭을 가정하여 좌현만을 횡경사시켰고, 이 경우는 우현으로만 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 사향시켜서 실험을 수행하였다. 본 실험에서의 좌표계는 Fig. 3과 같이 선수부를 양의 x축, 우현을 양의 y축으로 하는 직각 우수 좌표계인 선체 고정 좌표계를 사용하였다.

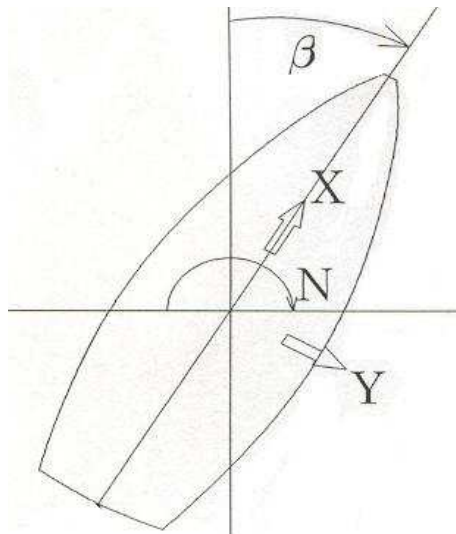
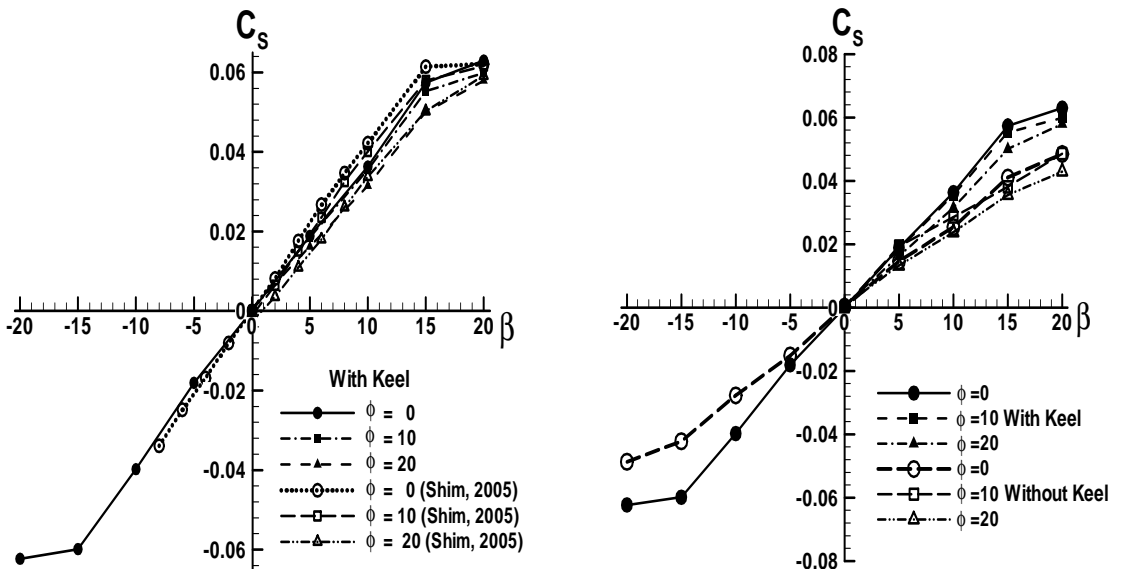


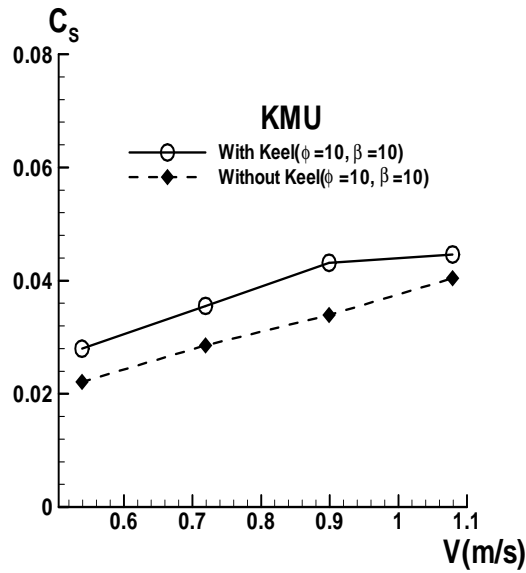
Fig.10 Coordinate system

여기서 X : x축(길이) 방향의 힘
 Y : y축(폭) 방향의 힘
 N : z축 주위 모멘트

Fig. 11(a)는 심상목(2005)과 비교한 결과이다. 저항시험과 마찬가지로 정량적으로는 다소 차이를 보였으나 정성적으로는 경향이 비슷한 것을 알 수 있으며, 횡경사(ϕ)가 커질 때 횡방향의 힘은 적어진다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 11(b)에서 보듯이 길이 있는 경우와 없는 경우 횡 방향으로 횡경사각 별로 20% 정도까지 차이가 발생하였다. Fig. 11(c)는 횡경사각이 10° 이고 사향각이 10° 일 때 유속을 변화시켜 가며 길의 영향을 비교한 것이다. 여기서 보듯이 요트의 횡방향의 힘은 유속에 따라 거의 선형적으로 증가하였으며, 이때에도 길의 영향은 20%정도로 나타났다. 다만 고속 (1.079m/s)에서 길의 영향이 상대적으로 적어졌는데 이것이 길의 영향에 의한 것인지에 대하여는 추가적인 조사가 필요하겠다. Fig 12.은 길이 부착되어 있는 상태에서 여러 횡경사각에 대하여 사향각의 변화에 따른 Yaw moment를 측정된 결과이다. 횡경사각에 따라 Yaw Moment가 커지는 경향이 있었고, 심상목(2005)과 비교해 봤을 때 정량적으로 비슷한 결과가 나왔다. 끝으로 길이 Yaw Moment에 미치는 영향은 지대한 것으로 나타났다.

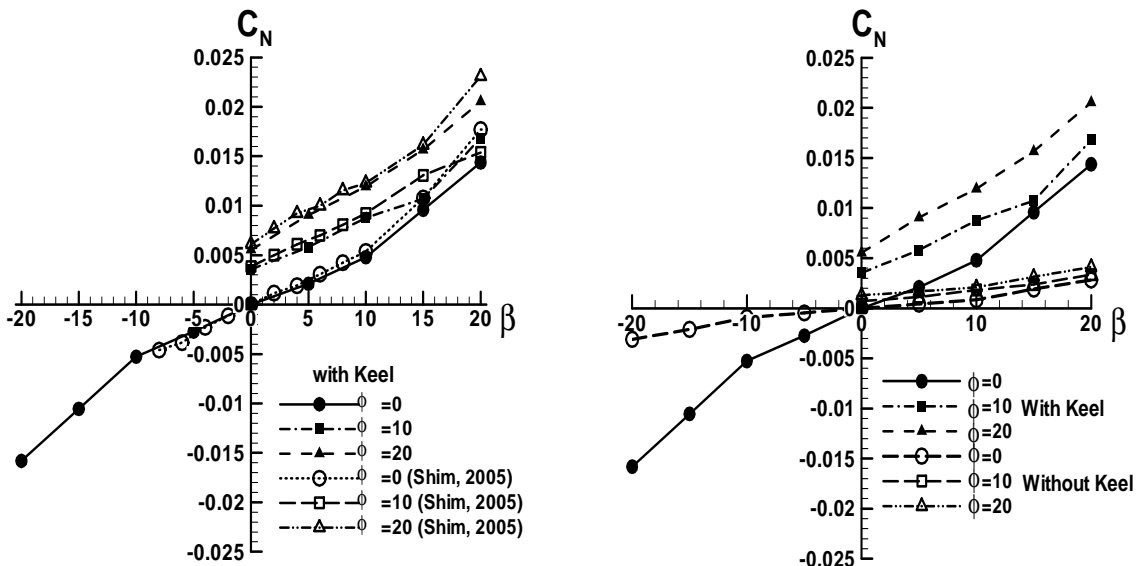


(a) Comparison with Shim (2005) (With Keel) (b) With and Without Keel



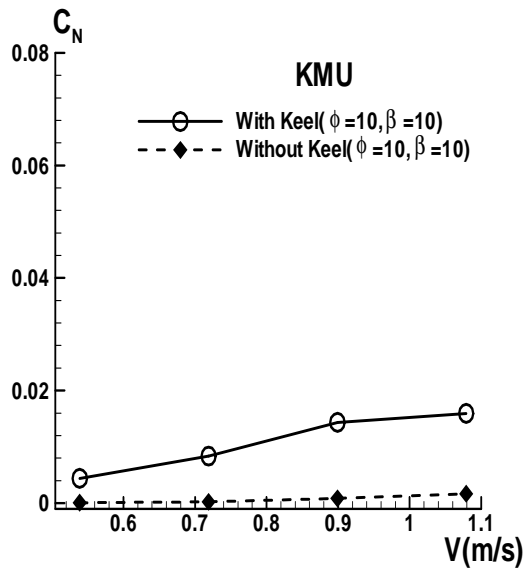
(c) Effect of Velocity ($\beta=\phi=10^\circ$)

Fig.11 Results of Heeling and Leeway Test (Side Force C_s)



(a) Comparison with Shim (2005) (With Keel)

(b) With and Without Keel



(c) Effect of Velocity ($\beta=\phi=10^\circ$)

Fig.12 Result of Heeling and Leeway Test (Yaw Moment C_N)

3.3 킬 단독 시험

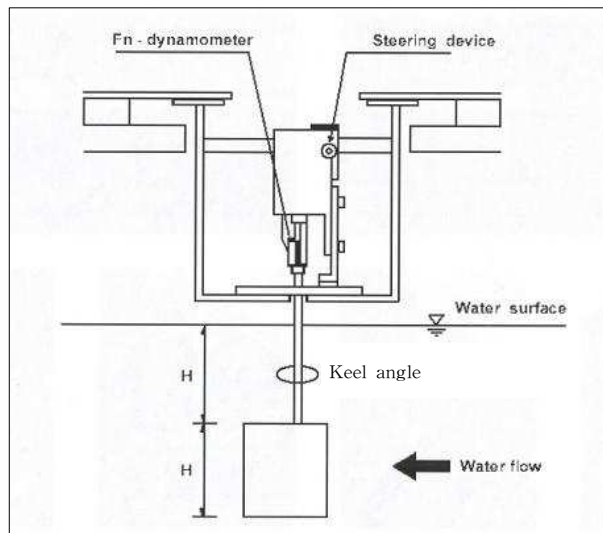


Fig.13 Keel Test Apparatus

Fig.13은 킬 단독 시험의 개념도를 나타내고 있다. 본 시험은 유체의 흐름에 대한 킬의 수직한 방향의 힘을 측정하여 킬의 양력을 측정하는 것이다. Table 5는 이번 실험의 실험 조건을 나타낸 표이다. 계측된 양력을 식(3)과 같이 무차원하여 C_L 로 나타내어 그중 $0\sim 20^\circ$ 까지의 결과를 이론식과 비교하여 나타내었다. 이때 레이놀즈 수는 1.104×10^5 인데, 이는 레이놀즈 수가 1×10^5 이상일 경우 레이놀즈 수의 차이에 의한 척도효과가 무시할만 하다고 알려져 있기 때문이다.(Okada, 1958) 식(5)은 본 실험과 비교하기 위한 이론식으로서 Whicker -Fehlner (Lewis, 1989)의 식이다.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho L^2 V^2} \quad (4)$$

(L: 킬의 평균 코드 길이, ρ : 물의 밀도, V: 유속)

Table 5. Keel & Test Condition

Mean Chord	Span	Area	Rn	Velocity
0.141m	0.1623m	0.0229m ²	1.104×10^5	0.719m/s

$$\left(\frac{\partial C_L}{\partial \beta}\right)_f = \frac{0.9 \times 2\pi \times a}{\cos \theta \sqrt{\frac{a^2}{\cos^4 \theta} + 4 + 1.8}} \quad (5)$$

(a : 유효중형비 θ : 후퇴각 β : 양각)

Fig. 14은 킬 단독 시험과 이론식을 비교한 것인데, 실험과 이론이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 각이 커지면서 본 실험치가 다소 작아지는 것은 실속현상 (Stall)이 발생하기 시작하기 때문이 아닌가 여겨진다.

그리고 횡경사-사향시험 중에 요트의 직립상태의 실험에서 킬이 있을 경우에서의 C_S 에서 킬이 없는 경우의 C_S 을 빼주어서 순수한 킬만의 C_S 을 계산하여 킬 단독 시험 결과와 비교하여 보았다. Fig. 15에서 보듯이 상당히 잘 일치함

을 알 수 있었고 이에 따라서 킨의 성능 파악을 위해서 킨 단독으로 성능을 연구하는 것도 무방하다고 생각된다. 또한 이 실험으로부터 사항시험과 킨 단독 시험의 신뢰성 검증도 가능하였다.

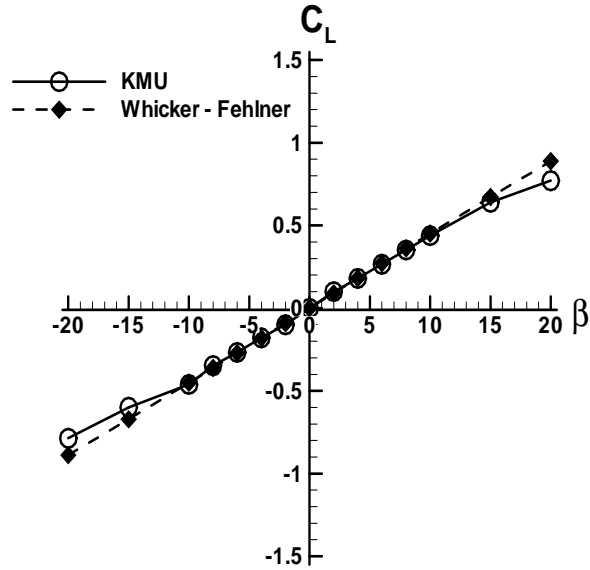


Fig. 14 Results of Keel Test

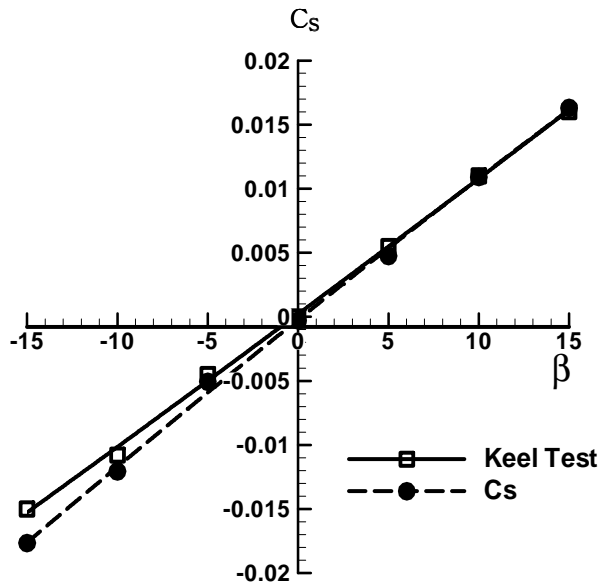


Fig.15 comparison of Heeling - Leeway test & Keel test

3.4 PIV 실험

3.4.1 PIV 원리

속도계측을 위한 정량적 가시화 기법(Quantitative Visualization Technique)의 한 종류로 유동장에서 유체입자의 속도는 어느 한 점을 통과하는 추적 입자가 미소 시간간격에서(ΔT)의 추적 입자가 이동한 거리(ΔS)를 계측하여 입자의 이동속도를 구하는 방법으로, 단 여기서 추적 입자는 미소시간동안 직선운동을 한다는 가정이 전제되어야 한다.

PIV를 LDV(Laser Doppler Velocimetry)와의 장·단점 비교를 하면, PIV의 장점은 비정상 유동장의 다차원 동시 다점 계측이 가능하고, 원리적으로 CFD에 대응할 수 있는 유일한 계측기법이며, 유동장 영상의 기록, 보존 및 재생이 가능하며 시스템 구성이 용이하다. 반면, 단점으로는 시공간 해상도가 비교적 낮으며, 최적조명 및 입자선별의 제약이 있다

LDV의 장점은 계측 점의 시간해상도가 높으며, 정도 높은 시간 평균속도 값이 제공된다. 단점은 동시 다점 계측이 원리적으로 어렵고, 비정상 계측이 불가능하며, 시스템 구성이 비교적 복잡하다.

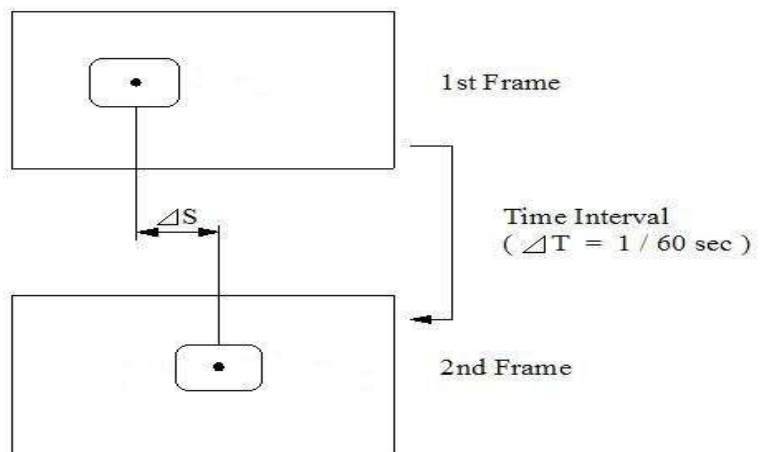


Fig. 16 PIV Principle

3.4.2 계측부 조명 및 영상 촬영

PIV는 재현성을 갖춘 유동장의 확보가 필요하며, 투명한 아크릴 또는 유리관 등으로 굴절률을 고려하여 구성된 유동장에 작동유체 및 계측속도 범위에 따른 입자를 선정하여 추적 입자를 주입하면 된다. 추적 입자 선택은 저속액체의 경우에는 주변의 온도변화에 따른 입자의 미소한 밀도차이가 추종성에 큰 영향을 미친다는 것과 입자 주입에 따른 이상(二相)유동특성 또는 초기 교란상태를 억제하여야 한다는 것을 주의하면 된다.

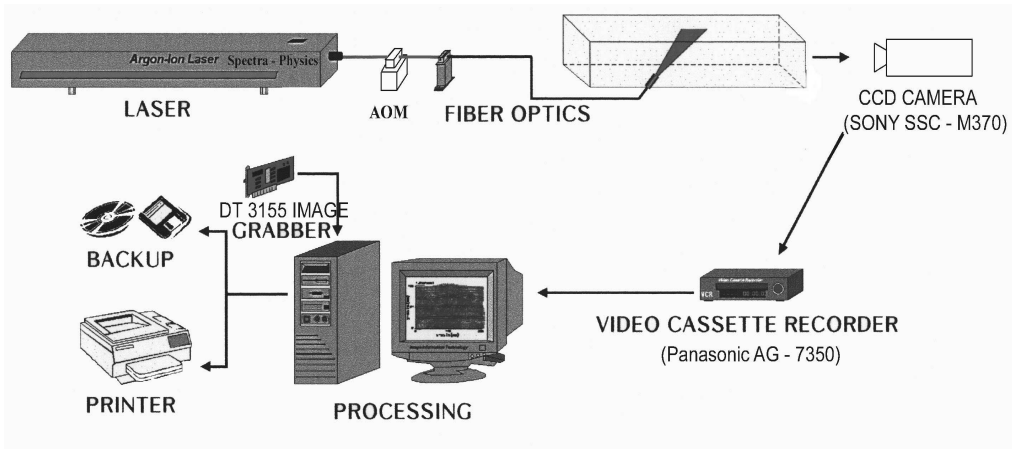


Fig.. 17 PIV System

PIV에 사용되는 조명은 2차원의 경우에 Light Sheet가 필요하며, 이 때 사용되는 광원으로서 300mW~10W의 Ar-Ion Laser, Fiber Optical Cable, Cylindrical Lens로 구성된 Laser 조명세트가 가장 효과적이다. Laser 대신에 백색광원도 유효하나 발생열에 의한 유동장의 변동이 발생할 수 있으며 특히 저속액체의 경우 광원용 조명열에 의한 자연대류가 발생할 수 있으니 조심하여야 한다. 광원의 강도로는, 저속액체의 경우는 1.0m/sec 이하이며 유동장의 크기가 150mm × 150mm에서는 500mW 전후, 그리고 고속기체의 경우는 10 ~ 40m/sec 범위이며 유동장의 크기가 150mm × 150mm에서는 보통 5W 전후의 출력이 필요하다. 고속유동계측의 경우에는 미소시간 간격을 확보하기 위하여 조명의 펄스제어가 필요하며, 1 Frame Auto-Correlation 방식의 Pulse Laser 조명을 사용하면 400m/sec의 고속기류까지 계측이 가능하다.

본 연구에서 유동가시화 장치는 6W Ar-Ion Laser, Fiber Optic Cable 및 Cylindrical Lens가 부착된 Probe를 사용하였다. 두께 5mm 정도로 생성된 Laser Sheet는 수중의 후방의 50cm×50cm 정도를 조사하도록 조절하였다. 산란입자로는 보편적으로 기체의 경우 10 마이크론 전후의 광 산란성이 우수한 미소입자(액적, 기체, 분말)를 사용하며 액체의 경우는 폴리스티렌 구형입자(직경 10 ~ 100 마이크론 전후) 또는 알루미늄분말 등을 사용하는데 본 실험에서는 비중이 1.1인 50마이크론 Vinyl Chloride Polymer를 사용하였다.

조사된 레이저 평면광이 입자에 의해 반사 또는 산란되어 발생하는 2차원영상은 CCD Camera(SONY SSC - M370)로 640×480 Pixel 해상도로 촬영과 동시에 Video Cassette Recorder(Panasonic AG - 7350)에 녹화한 후 Image Grabber(DT 3155)를 사용하여 1/30초 동안의 순간 이미지를 PC로 받아들였다. 촬영된 유동장의 영상은 언제든지 반복처리가 가능하며, 영상입력 신호는 일반적으로 NTSC(National Television System Committee) Composite 방식을 사용한다. 본 실험에서는 요트의 선체와 킬의 후류를 잘 관측하기 위해서 카메라를 수밀 아크릴통에 삽입하여 수중에 직접 설치하였다.

3.4.3 PIV 계측 결과

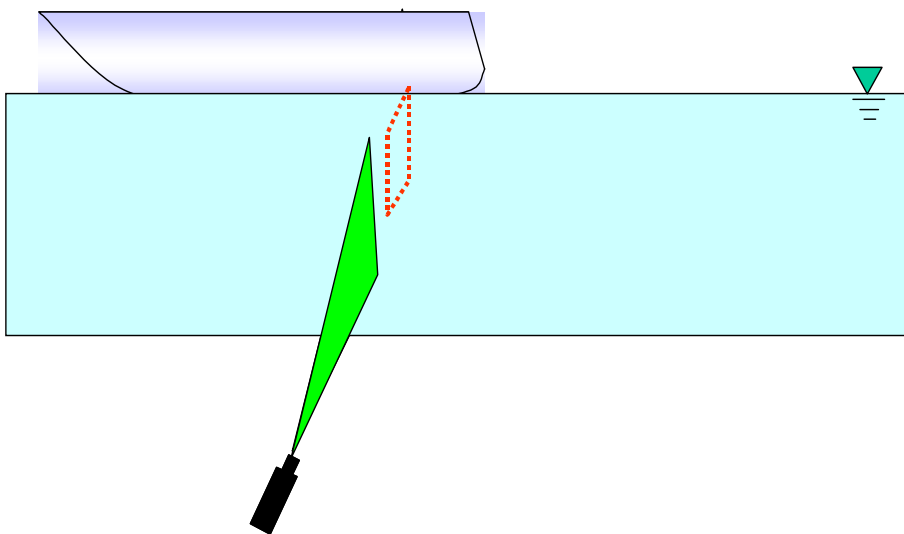
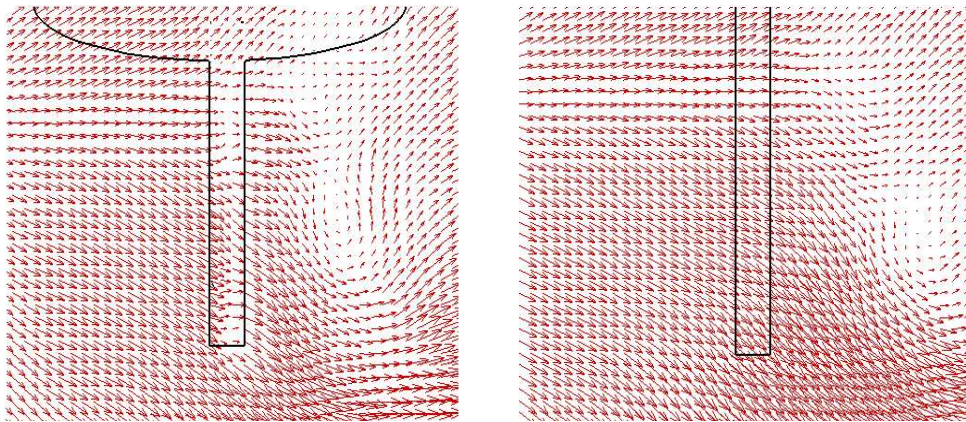


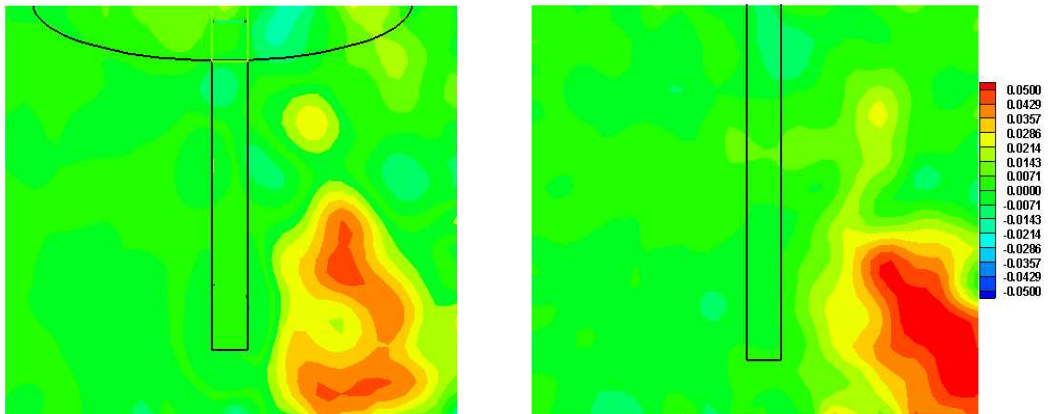
Fig. 18 Schematic of Experiment

앞서 수행한 횡경사-사향시험과 타 단독 시험의 비교에서는 직립 직진 상태에서 비교를 하여 킬을 단독으로 성능 비교를 하여도 무방하다고 가정하였다. 그러나 요트의 항주자세에 따라 킬이 선체 하부에 있을 경우와 없을 경우, 그리고 킬 만을 단독으로 실험했을 때를 비교하여야만 완전한 가정이라고 할 수 있을 것이다. 그래서 이 실험을 통하여 킬과 선체 간의 상호 작용이 항주자세에 따라서도 무시할 만한지를 검증해본다.

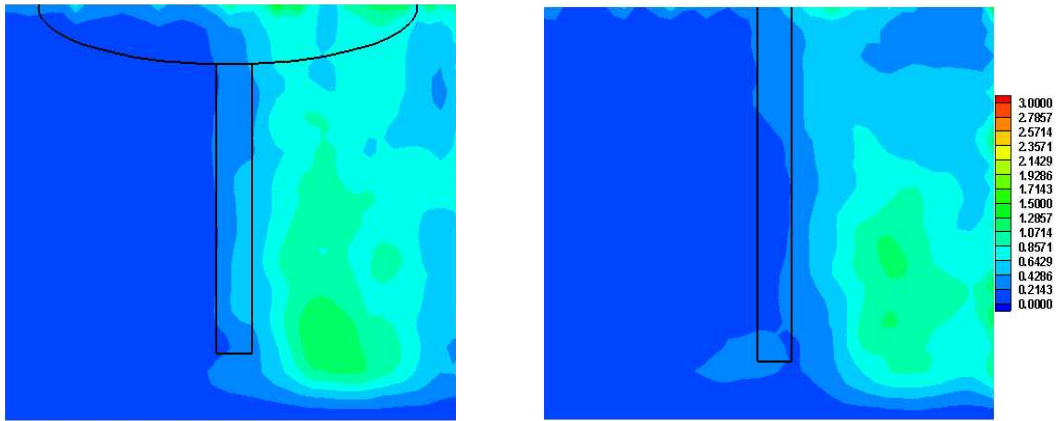
실험은 횡경사가 10° 이고 사향각이 20° 인 경우의 후류를 관측한 결과로서, 선체에 킬이 부착되어 있을 때와 킬만 있을 때를 비교하여 보았다. 실험 유속은 0.2m/s 였고, 킬의 평균 코드 길이에 기초한 레이놀즈 수는 28000이었다.



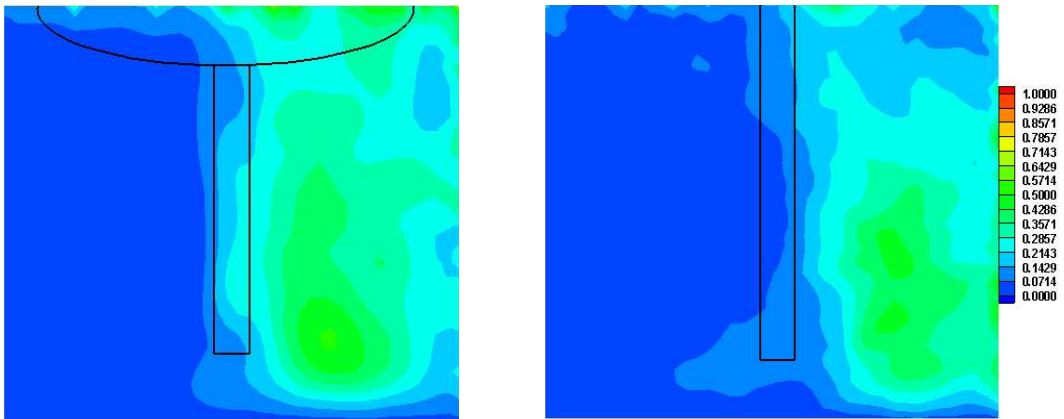
<Velocity vectors>



<Vorticity>



<Reynolds Energy Stress>



<Turbulent Kinetic Energy>

Fig. 19 PIV result of Yacht Hull & Keel interaction

Fig.18에서와 같이 킨 끝의 Trailing edge에서 킨 끝의 Chord 길이만큼 후방 ($x/c=1$)의 위치에 레이저를 조사하였고, 이는 모형선에 킨이 부착되어 있을 경우, 모형선의 10개의 스테이션 중 킨 끝이 4번 스테이션에 위치하고 레이저의 단면은 3번 스테이션에 조사되는 것이다. 그리고 CCD 카메라를 아크릴 수밀통에 넣어서 수중에서 레이저 단면과 평행하게 하여 촬영을 하였다. 본 실험시의 레이놀즈 수는 층류에 속하지만 수조내의 흐름자체에 난류성분이 포함되어 있고,

또한 모형의 거칠기의 영향 등으로 실제 모형 주위의 흐름은 난류 유동으로 볼 수 있다. Fig.19은 횡경사가 10° 이고 사향각이 20° 인 경우에서 실험한 결과로서 평균속도 벡터와 와도, 레이놀즈 스트레스, 난류 운동 에너지를 비교해 본 결과이다. 이 그림에서 보듯이 요트 선체와 킬의 상관관계가 크지 않음을 알 수 있다. 이는 직립상태에서의 횡경사-사향시험과 킬 단독 실험을 통해 가정했던 킬의 유체력의 계측과 유동 특성의 비교를 위해서 킬을 단독으로 실험 하는 것이 유효하다는 것이 검증되었다.

4. 킬의 형상에 따른 성능 평가

4.1 저항시험을 통한 킬의 형상별 비교

이 실험은 벌브에 의한 항력과 윙렛에 의한 항력을 추정하기 위해서 실험을 하였다. 실험은 선체하부에 킬만 있을 경우, 핀 킬에 벌브가 부착되어진 경우 벌브 킬의 경우, 그리고 윙렛을 부착한 윙렛 킬의 전저항계수를 비교하였고, 실험 유속은 Table. 4와 동일하였다. Fig.20에서 보듯이 핀 킬의 경우보다 벌브 킬과 윙렛 킬의 경우가 모두 핀 킬과 비교하여 5%정도 전저항계수가 높게 측정되었다. 이는 벌브와 윙렛에 의한 침수표면적의 증가로 인한 마찰저항의 증가로 추정되며, 벌브와 윙렛에 의해 항력이 5%정도 증가된다고 추정된다. 정확한 항력을 추정하기 위해서는 킬 단독 실험과 같이 킬만을 선체에서 분리하여 사향각도에 따른 항력을 계측하여야 하지만 장비의 한계로 인해 항력을 저항시험을 통해서 추정만을 해보았다.

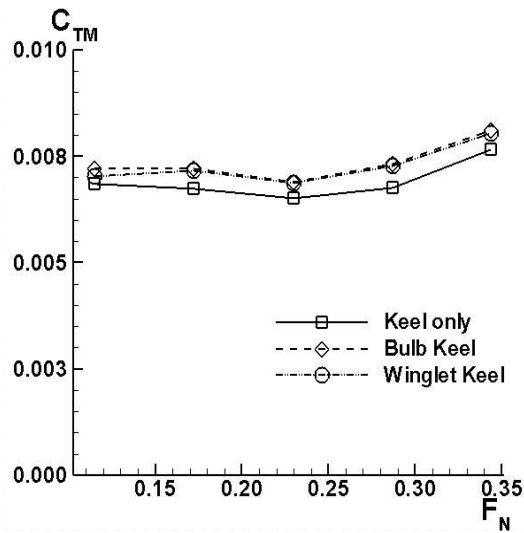


Fig. 20 Result of Resistance Test (Three Different Types of Keel)

4.2 킬 단독시험을 통한 킬 형상별 비교

이 실험은 킬에 작용하는 양력을 측정하여 이를 킬에 작용하는 횡방향의 힘 (Side Force)으로 가정하여 킬의 형상에 따른 성능 추정을 하였다. 실험은 Table 5의 실험조건과 동일하게 수행하였고, 킬의 형상을 킬만 있을 경우, 킬에 벌브가 부착되어진 경우, 그리고 윙렛을 부착한 경우에서 실험을 하였다. Fig.21에서 보듯이 벌브 킬의 경우 횡방향의 힘이 10%정도 증가하였고, 윙렛 킬의 경우 10~15%정도 증가하였다. 사향각 20° 이하일 때는 윙렛 킬이 벌브 킬보다 횡방향의 힘이 약간 컸으나 20° 이상에서는 오히려 핀 킬의 경우 이하로 떨어졌다. 이는 20° 이하의 각도에서는 윙렛이 킬의 압력면에서 흡입면으로의 Roll-up현상을 막아주어 횡방향의 힘이 커진 것이 아닌가 생각되며, 20° 이상에서는 사향각이 커지므로 인해 윙렛의 면적이 충분히 Roll-up 현상을 막아주지 못해서 이런 현상이 생긴 것이 아닌가 생각된다. 벌브 킬의 경우 킬의 Tip 두께보다 2배정도인 4.5cm고 킬 끝의 Chord 방향의 길이인 11.6cm보다 큰 14cm로 킬 끝의 면적보다 충분히 크므로 Roll-up 현상이 일어나지 않을 것이라 여겨서 횡방향의 힘이 3개의 형상 중에서 가장 클 것이라고 여겼지만,

Fig. 22~29에서 와도와 PIV 영상을 확인한 결과 Roll-up 현상을 충분히 막지 못해서 벌브의 효율이 예상과는 달리 나온 것이 아닌가 생각된다. 윙렛 킬의 경우, 윙렛 양쪽 날개의 길이 합이 킬 끝의 두께방향으로 킬 끝 최대두께의 7 배 정도였는데, 이 결과로부터 벌브의 두께를 킬 끝 두께의 2배가 아니고, 더 크게 설계한다면 더 효율이 높은 킬을 설계할 수 있을 것이라 여겨진다. 이에 관한 parametric study가 필요하다고 여겨진다.

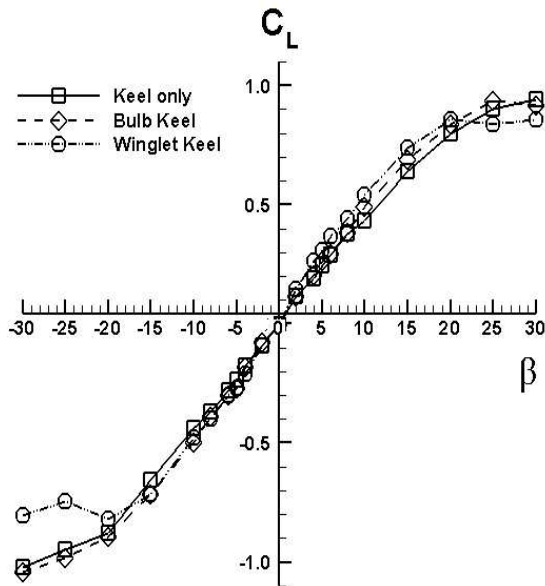


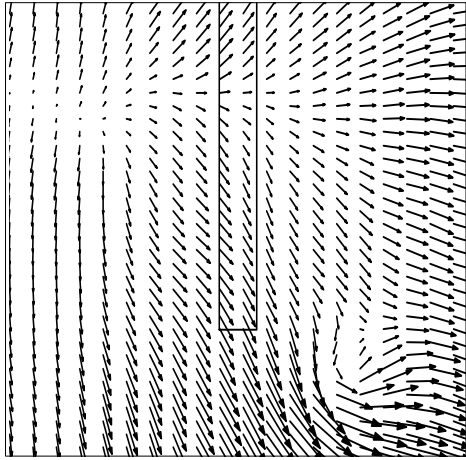
Fig. 21 Results of Keel Test (Three Different Types of Keel)

4.3 PIV 실험을 통한 킬 형상별 비교

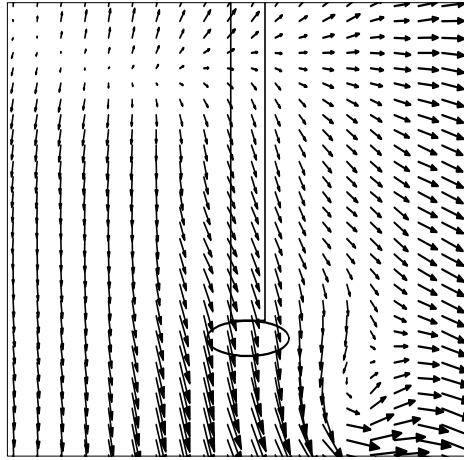
이 실험은 킬을 단독으로 하여 3가지 형상의 후류를 비교하였다. 실험조건은 우리 계측 시스템의 성능 상 빠른 유속에서의 실험이 불가능하였기 때문에 유체의 자유흐름 속도를 0.2m/s로 하여 실험을 수행하였고, 이 실험의 $Re=28000$ 이었다. Fig.18에서처럼 요트의 선체를 제외하고 동일하게 실험하였고, 킬 끝의 Trailing edge에서 킬 끝의 Chord 길이만큼 후방($x/c=1$)의 위치에 레이저를

조사하였고, CCD 카메라를 아크릴 수밀통에 넣어서 수중에서 레이저 단면과 평행하게 하여 촬영을 하였다. 횡경사에 의해서는 유동의 변화가 크지 않을 것으로 예상하여 10°와 20°의 사향각만을 주어 실험하였다. Fig.22~25 은 사향각이 10°일 때의 3가지 형상의 Keel의 후류의 평균속도 벡터, 와도, 레이놀즈 스트레스, 난류 운동 에너지이며, Fig.26~29은 사향각이 20°일 때 평균 속도 벡터, 와도, 레이놀즈 스트레스, 난류 운동 에너지를 비교한 그림이다.

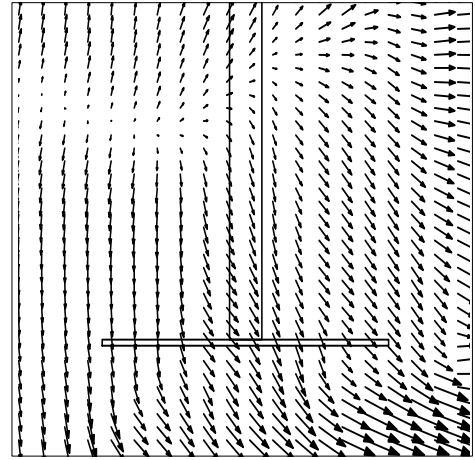
사향각이 10°일 때와 20°의 와도를 보면 핀 킬과 벌브 킬은 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 이를 윙렛 킬과 비교해보면 와도가 큰 차이가 남을 알 수 있다. 이는 핀 킬과 벌브 킬은 킬의 끝에서 Roll-up현상이 일어난 것으로 생각된다. 벌브 킬의 경우는 효율을 더 높이기 위하여 킬 끝의 두께 방향으로 더 크게 설계한다면 더 높은 횡방향의 힘을 얻을 수 있는 킬을 설계할 수 있으리라 생각된다. 그러나 증가하는 면적만큼 항력이 증가할 것이므로 벌브의 크기나 형상 등의 Parametric study를 통해 더 알아볼 필요가 있을 것으로 생각된다. 윙렛 킬의 경우, 킬 단독 실험 결과 사향각이 20°까지는 가장 큰 횡방향의 힘이 계측되었는데, 와도를 보면 알 수 있듯이 킬 끝에서의 Roll-up현상을 충분히 방지한 것에서 원인을 찾을 수 있을 것이다.



(a) Fin Keel



(b) Bulb Keel



(c) Winglet Keel

Fig. 22 Velocity vectors($\beta=10^\circ$)

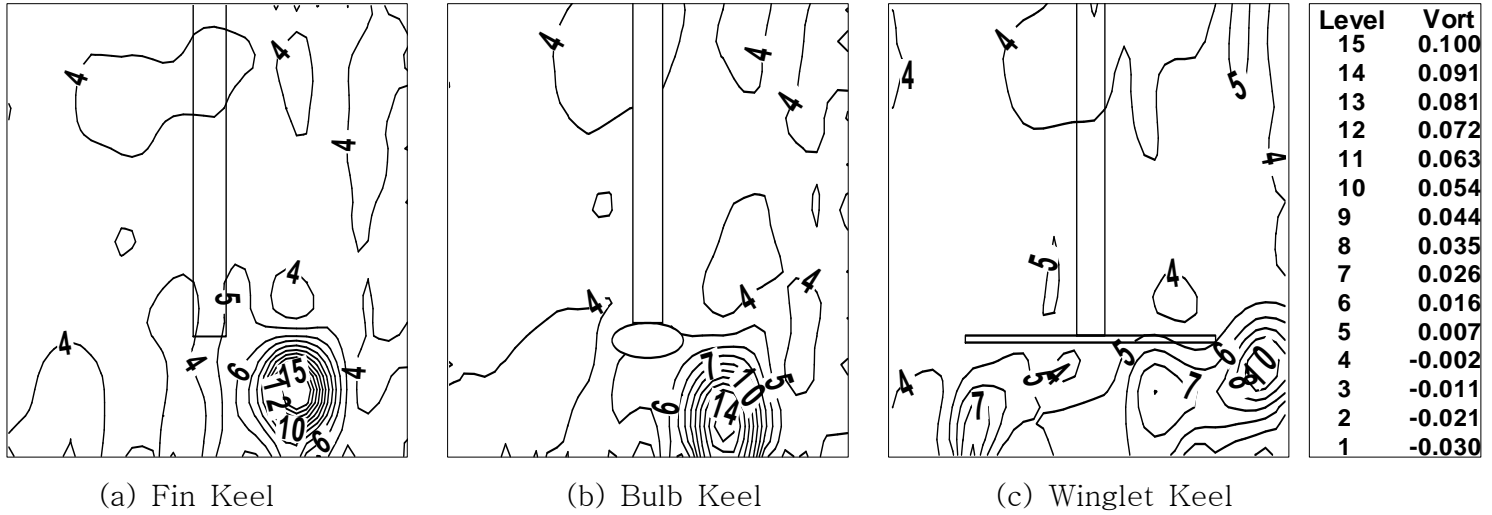
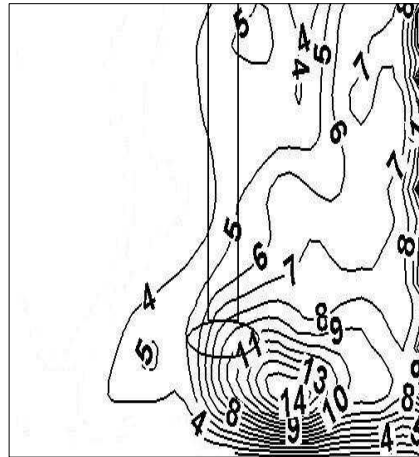


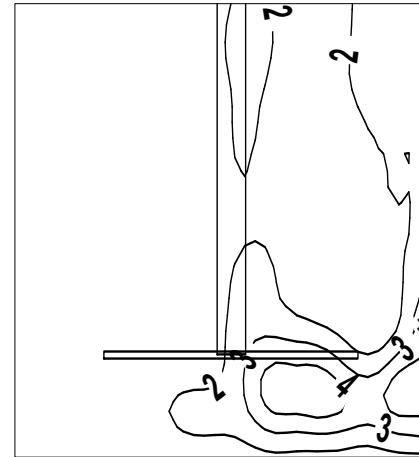
Fig. 23 Vorticity($\beta=10^\circ$)



(a) Fin Keel



(b) Bulb Keel



(c) Winglet Keel

Level	RES
15	3.000
14	2.786
13	2.571
12	2.357
11	2.143
10	1.929
9	1.714
8	1.500
7	1.286
6	1.071
5	0.857
4	0.643
3	0.429
2	0.214
1	0.000

Fig. 24 Reynolds Energy Stress($\beta=10^\circ$)

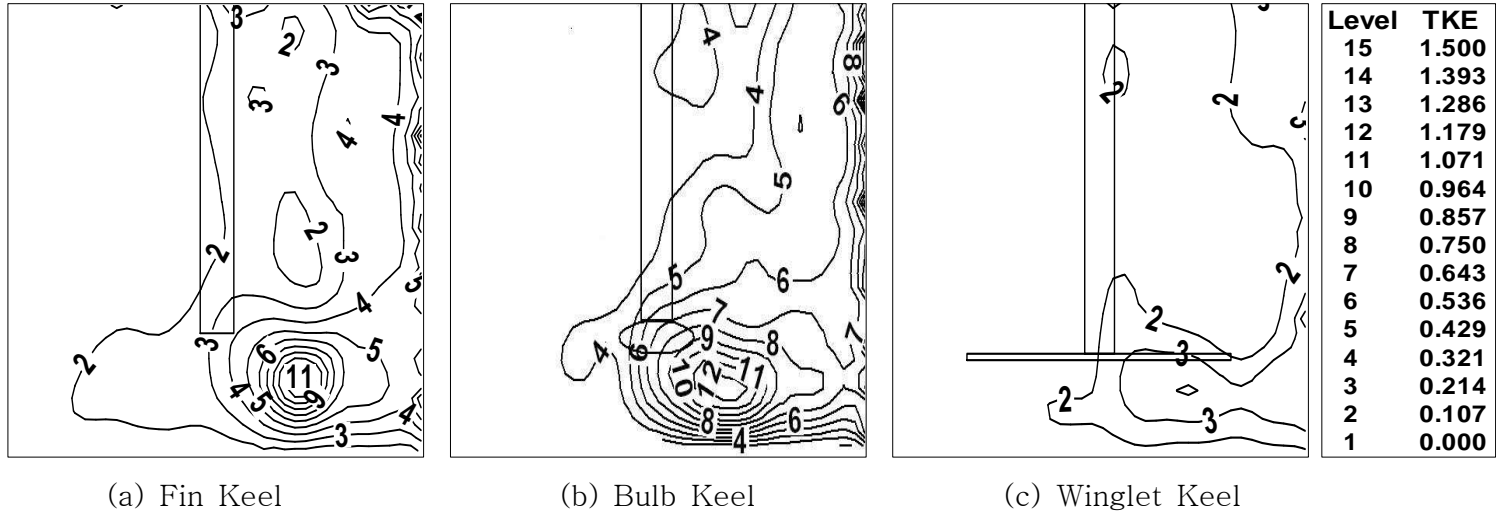
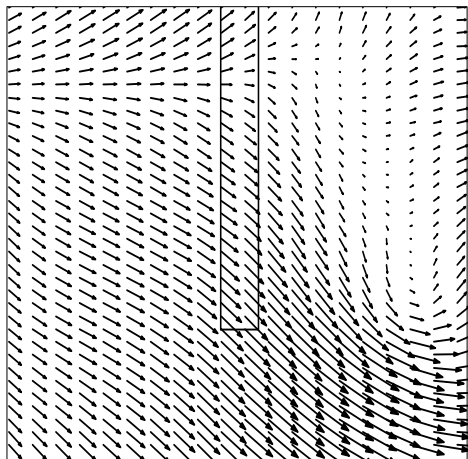
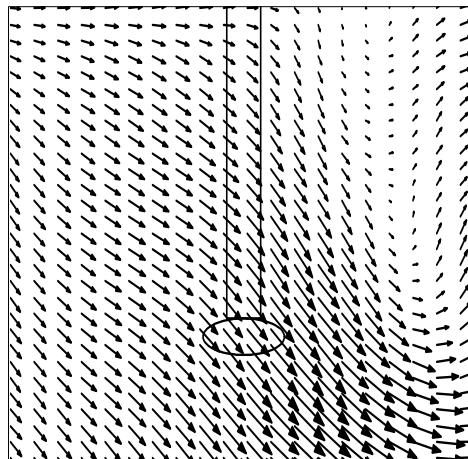


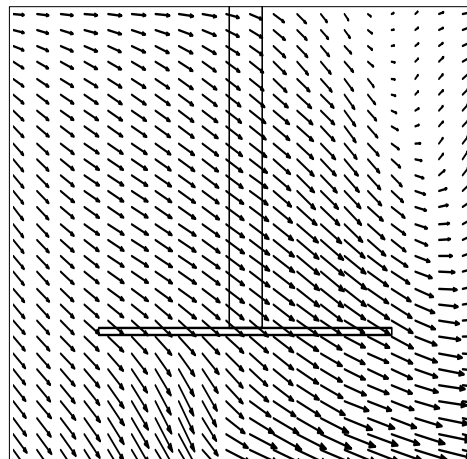
Fig. 25 Turbulent Kinetic Energy($\beta=10^\circ$)



(a) Fin Keel

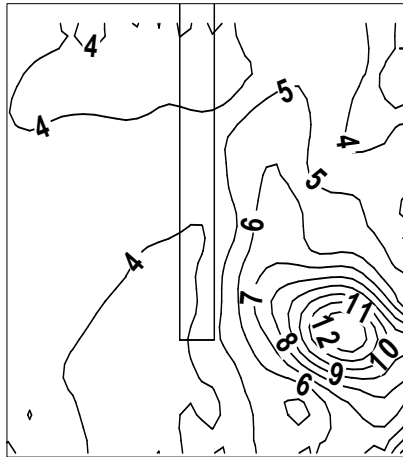


(b) Bulb Keel

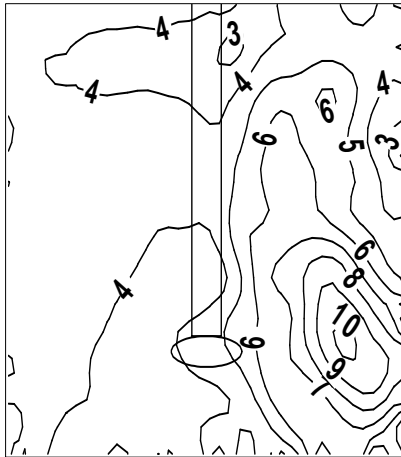


(c) Winglet Keel

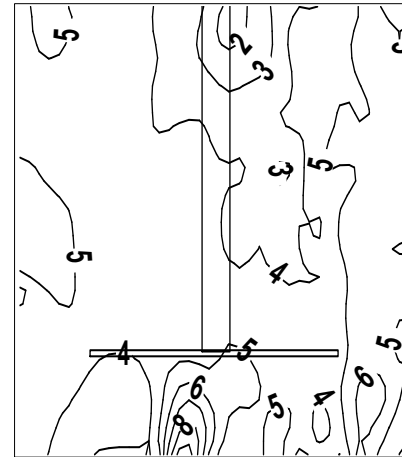
Fig. 26 Velocity vectors($\beta=20^\circ$)



(a) Fin Keel



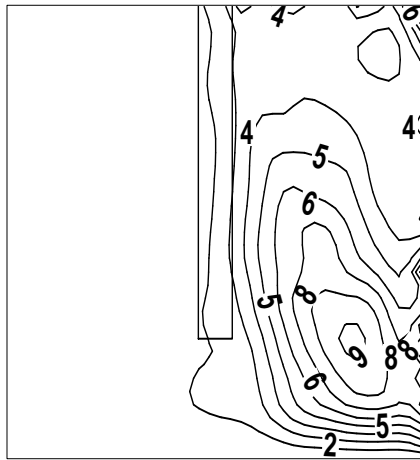
(b) Bulb Keel



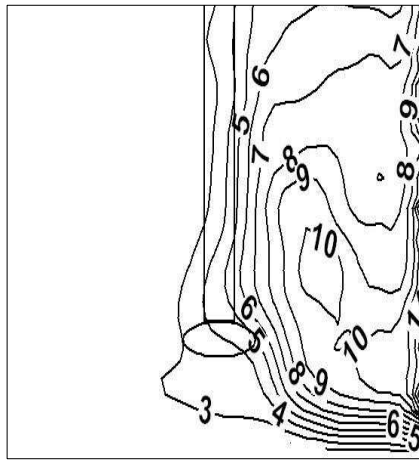
(c) Winglet Keel

Level	Vort
15	0.100
14	0.091
13	0.081
12	0.072
11	0.063
10	0.054
9	0.044
8	0.035
7	0.026
6	0.016
5	0.007
4	-0.002
3	-0.011
2	-0.021
1	-0.030

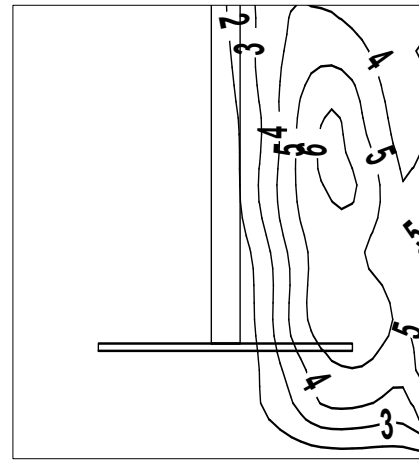
Fig. 27 Vorticity($\beta=20^\circ$)



(a) Fin Keel



(b) Bulb Keel



(c) Winglet Keel

Level	RES
15	2.000
14	1.857
13	1.714
12	1.571
11	1.429
10	1.286
9	1.143
8	1.000
7	0.857
6	0.714
5	0.571
4	0.429
3	0.286
2	0.143
1	0.000

Fig. 28 Reynolds Energy Stress($\beta=20^\circ$)

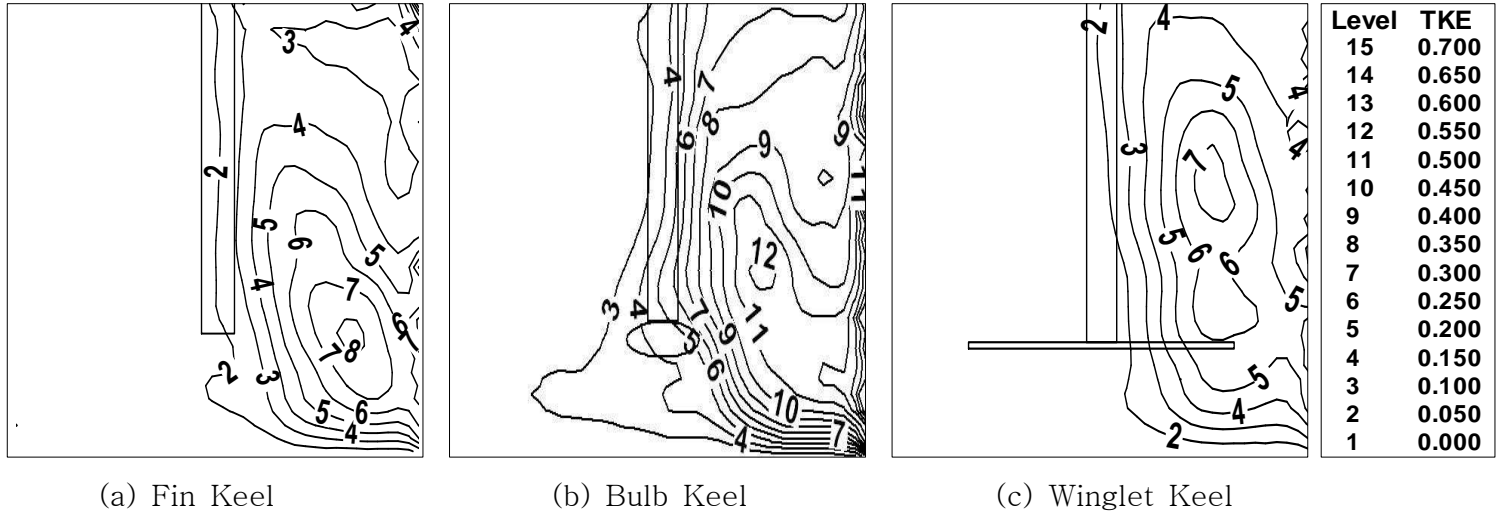


Fig. 29 Turbulent Kinetic Energy($\beta=20^\circ$)

5. 결론

본 논문에서는 킬의 형상에 따른 성능 비교하기 위하여 요트 선체와 킬 간의 상관관계를 선체에 킬이 부착되어 있는 경우와 선체만 있는 경우의 횡경사-사향시험을 통해 얻어진 횡방향의 힘(Side force)의 차와 킬 단독 시험을 통한 킬만의 횡방향의 힘을 비교한 결과 요트 선체와 킬의 상관관계는 무시 가능한 것으로 파악되었다. 이 결과로부터 킬만을 따로 분리하여 핀 킬과 벌브 킬, 윙렛 킬의 3가지 형상의 성능 비교를 하였다. 그 결과 사향각이 20° 이하일 경우는 횡방향의 힘의 경우 윙렛 킬이 가장 우수하지만 20° 이상에서는 급격한 하락을 하였다. 벌브 킬의 경우 윙렛 킬과 비슷한 횡방향의 힘이 측정되었다. 그러나 벌브 킬은 킬의 끝(Keel Tip)에서 Roll-up현상이 일어났다. 벌브 킬의 경우는 Roll-up현상을 제거할 수 있는 Tip 방향으로의 두께를 고려한 설계를 한다면 횡방향의 힘의 효율이 더 커질 것으로 판단된다. 그러나 본 논문의 실험은 사향에 의한 항력을 측정하지 못하였고, PIV 실험도 너무 낮은 유속에서 실험을 하였으므로 정확한 양력과 항력의 측정을 통한 유체력 평가와 더 높은 유속에서의 PIV 실험이 필요할 것으로 생각되며, Bulb와 Winglet의 형상이나 크기 등에 대한 parametric study도 필요하다고 판단된다.

참고 문헌

- [1] 박종헌, 박근용 외, 2004, “세일링 요트 개발을 위한 20세기초 전통어선의 선형연구”, 한국해양 공학회지 제 18권 제 4호, pp, 71-76
- [2] 심상목, 2005, “항주자세를 고려한 세일링 요트의 선형시험 기법연구”, 부경대학교 박사학위 논문, pp. 1-144
- [3] 유재훈, 김진 외, 2004, “요트의 전, 후 세일 사이의 간섭효과에 대한 수치해석”, 대한조선학회추계학술대회논문집, pp. 181-189
- [4] 유재훈, 반석호 외, 2004, “30피트급 요트의 선형개발 및 성능추정”, 대한조선학회 추계 학술대회논문집, pp. 172-180
- [5] 유재훈, 박일룡 외, 2005, “요트의 Main세일과 Jib세일 사이의 간섭효과에 대한 수치해석”, 대한조선학회논문집,42권 제 1호, pp. 24-33
- [6] 최기철, 현범수 외, 2005, “요트 Keel의 유무에 따른 성능 변화 연구”, 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 352~358
- [7] R.G.J. Flay, D.C.McMillan, 1993, "A Wind Tunnel Investigation of Yacht Hydrodynamic Side Force and drag", Journal of ship Research, Vol. 37, No. 4, pp. 331-341
- [8] J. Gerritsma, R. Onnink and A. Versluis, 1981, "Geometry Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht Hull series", Internal Shipbuilding Progress Vol. 28 no 328.
- [9] D.S. Greeley and J.H. Cross-Whiter 1989,"Design and Hydrodynamic Performance of Sailboat Keels", Marine Technology, Vol. 26, No. 4, pp. 260-28

- [10] S. Killing, 1998, Yacht Design Explained, W.W.W Norton & company
- [11] L. Larsson, R.E. Eliasson, R.E., 2000, principles of Yacht Design, International Marine of McGraw-Hill
- [12] E.V. Lewis, 1989, Principles of Naval Architecture, Vol. III, 2nd Revision, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City.
- [13] C.A. Marchaj, 1979, "Aero-Hydrodynamics of sailing", Granda Publishing, London
- [14] K. Nomoto and H. Tatano, 1978, "Hydrodynamic Analysis on sailing (1st Report)", Journal of the Kansai Society of naval Architects, Japan, Vol. 170, pp.11-18
- [15] S. Okada, 1958, "On the Results of Open Test of Model Rudders(Hydrodynamical Research of Ship's Rudder-the Second Report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 103. pp. 91-98
- [16] N. Takada, H. Miyata, 1998, "CFD Simulation of 3-dimensional motion of a vehicle with movable wings", J. SNAJ Japan, Vol.184, pp. 37~45