

## 대형유조선의 경사상태에서의 저항추진 성능추정

양지만<sup>†\*</sup>, 김효철<sup>\*\*</sup>

서울대학교 조선해양공학과 대학원<sup>\*</sup>  
서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소<sup>\*\*</sup>

### Prediction of Propulsive Performance of VLCC at Heeled and Trimmed Conditions

Jiman Yang<sup>†\*</sup> and Hyochul Kim<sup>\*\*</sup>

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, SNU<sup>\*</sup>  
RIMSE, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, SNU<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

In recent years, many environmentally disastrous oil spill accidents from damaged vessels become worse especially when the early treatment is not prompt enough. To properly handle this type of accidents and prevent further disasters, international organizations establish and impose various rules and regulations. In assessing the damages and providing salvage operations, the propulsive performance of damaged vessels is of great importance, as well as for containing oil spill while the vessels are being towed or self-propelled. Until now, many naval hydrodynamics researches have focused on the propulsive performance in normal operating conditions and only a few studies for damaged vessels are found in literature. In this paper, experimental method is used to study the propulsive performance of a very large crude-oil carrier (VLCC) in heeled and/or trimmed conditions.

※ Keywords: VLCC(저속비대선), Heeled and trimmed condition(경사상태), Propulsive performances(저항추진성능), Wake field measurement(반류계측)

#### 1. 서론

다량의 원유를 수송하는 저속비대선형이 해난을

당하는 경우 해난 사고로 인한 선체손상은 심각한 환경오염의 원인이 되어 왔으나, 지금까지는 통상적으로 운항성능을 개선하여 해난을 방지하는 측면에서 관심을 가지고 많은 연구들이 수행되어 왔을 뿐, 선체 손상을 당한 이후의 운항조건에 대한 연구 자료는 찾아보기 어려운 실정이다.

그러나 세계적으로 해양사고는 줄어들지 않고

접수일: 2005년 3월 28일, 승인일: 2005년 6월 13일

† 주저자, E-mail: snucrab@snu.ac.kr

Tel: 02-880-7333

있어서 최근에 이르러 사고선박을 처리하는데 따르는 유체역학적 성능을 파악하는 문제가 새로운 과제로 등장하고 있다. 예컨대 대형 원유운반선으로 사용되는 저속비대선형이 사고를 일으켜 비정상적인 자세를 갖게 되었을지라도 환경오염으로 인한 피해를 최소한으로 줄이기 위하여 저항 또는 예인하여 대처할 수 있는 가능성을 파악하는 것이 요구되고 있으며 이 때의 유체역학적 성능을 확인하는 것이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 이러한 선체의 일부가 손상돼 침수되어 횡경사와 종경사가 발생된 상태에 있는 저속비대선이 예인되거나 자체의 추진 장치로 운항할 수 있는 가상의 조건에서 저속비대선형의 저항 및 추진 성능의 변화를 살펴보기로 하였다. 이에 따라, 선체의 횡경사와 트림시의 조건에 대하여 저항시험, 저항시험 그리고 반류계측을 실시하였다(양지만과 김효철 2003, 양지만 등 2004a, 양지만 등 2004b, Yang et al. 2004).

2. 모형선 및 모형 프로펠러

실험대상으로 선정된 KTTC의 공동연구 선형인 KRISO 300K VLCC의 1/100 모형을 FRP로 제작하였으며 모형선의 선형 및 제원은 Fig. 1과 Table 1에 보인 바와 같다. 모형 프로펠러는 KTTC 공동연구를 위해 KRISO에서 설계한 것으로서 1/100 모형을 알루미늄으로 제작하였으며 주요제원은 Table 2에 보인 바와 같다.

3. 모형시험

본 논문에서는 저속비대선에 횡경사와 트림이 발생되었을 때의 저항추진성능을 실험적인 방법으로 확인하기 위하여 횡경사각이 변화하여 트림가이드와 예인점의 위치가 회전 중심점을 지나는 연직면으로부터 벗어나게 되는 것을 수용할 수 있도록 기기를 횡 방향으로 이동 배치하는 방법으로 실험을 수행하였으며, 연직면으로 구속하는 모형선 구속장치의 기구학적 거동에 적합한 회전식 모형선 구속기구를 고안한 후에 이를 사용하여 선체에 횡경사와 트림이 발생한 상태에서 저항시험,

저항시험 및 선체반류계측을 실시함으로써 비정상 상태에 있는 선박의 추진성능을 추정하였다. 새로 고안된 모형선 구속기구는 Fig. 2에 보인 바와 같다.

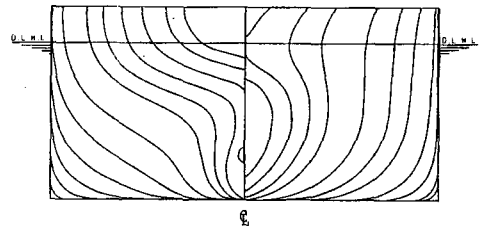


Fig. 1 Body plan of 300K class VLCC

Table 1 Principal particulars of the ship

	Ship	Model
Scale ratio	1	100
Design speed	15.5 (knots)	0.7973 (m/s)
LBP (m)	320.0	3.2000
LWL (m)	325.5	3.2550
Breadth (m)	58.0	0.5800
Depth (m)	30.0	0.3000
Draft (m)	20.8	0.2080
WSA (m <sup>2</sup> )	27320.0	2.7320
Volume (m <sup>3</sup> )	312737.5	0.3127
C <sub>B</sub>	0.8101	0.8101

Table 2 Characteristics of propeller

D (mm)	Blade No.	Scale ratio	
98	4	100	
(P/D) <sub>ROOT</sub>	(P/D) <sub>0.7R</sub>	(P/D) <sub>TIP</sub>	(P/D) <sub>MEAN</sub>
0.5765	0.7212	0.6510	0.6896
A <sub>E</sub> /A <sub>O</sub>	R <sub>1</sub> /R	(C/D) <sub>0.7R</sub>	(T <sub>O</sub> /D) <sub>0.7R</sub>
0.4250	0.1550	0.2338	0.0156

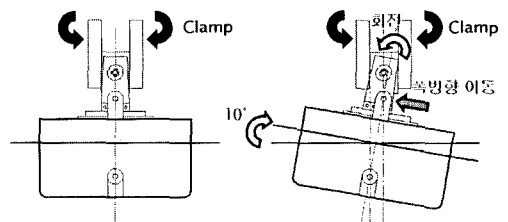


Fig. 2 Model fixing mechanism

3.1 저항시험

횡경사 및 트림 상태에서의 저속비대선형의 저항 특성을 알아보기 위해, 선체의 경사가 없는 정상 상태 일 때, 선체가 우현 쪽으로 1° ~ 5° 및 10° 횡경사진 상태일 때, 선수 또는 선미 트림이 0.5° 및 1°인 상태일 때, 2°, 5° 및 10°의 횡경사와 0.5°의 트림이 동시에 일어난 상태일 때, 5°의 횡경사와 1°의 트림이 동시에 일어난 상태일 때의 초기조건에 대해서 저항시험을 수행하였다.

선체의 횡경사와 트림이 저항성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 저속비대선형이지만 2차원의 방법을 사용하여 유효동력을 추정하였으며, 점성저항성분의 변화를 알아보기 위해 3차원 외삽법으로 형상계수(1 + k)를 추정해보았다.

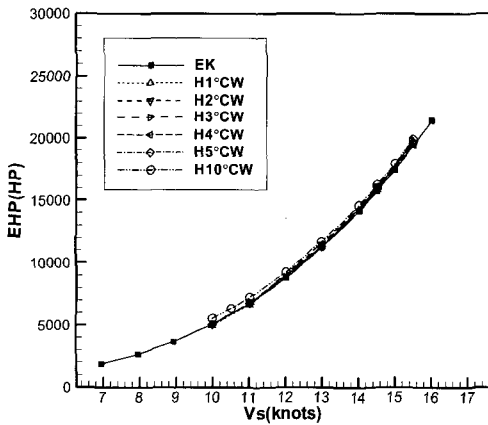


Fig. 3 Comparison of EHP(2D Extrapolation) at various heeled condition

Table 3 Comparison of EHP (Vs=15.5 knots) at various heeled condition

초기조건	EHP2D(HP)	(%)
Even keel	19411.5	100.0
Heel 1° CW	19673.1	101.3
Heel 2° CW	19653.0	101.2
Heel 3° CW	19771.1	101.9
Heel 4° CW	19544.9	100.7
Heel 5° CW	19654.2	101.3
Heel 10° CW	19876.4	102.4

Fig. 3 및 Table 3은 선체가 초기에 우현 쪽으로 1° ~ 5° 및 10° 횡경사진 상태일 때의 유효동력 추정결과를 나타낸 것이다. 선체저항에 대한 횡경사의 영향은 설계속도 근처에서 10°의 횡경사에서 최대 약 2.4%의 유효동력 증가로 나타났다.

다음으로, Fig. 3 및 Table 4는 초기에 선체의 선수 또는 선미 트림이 0.5° 및 1°인 상태일 때의 유효동력 추정결과를 나타낸 것이다.

Fig. 5, 6 및 Table 5, 6은 초기에 0.5°의 선수 또는 선미 트림과 2°, 5° 및 10°의 횡경사가 동시에 일어난 상태일 때의 유효동력 추정결과를 나타낸 것이다. 편의상 우현의 횡경사를 양(+의 값)으로, 선수쪽으로는 트림을 음(-)의 값으로 나타내었다. 선체저항에 대한 자세변화의 영향은 설계속도 근처에서 최대 약 8.3%의 유효동력 증가로 나타났다.

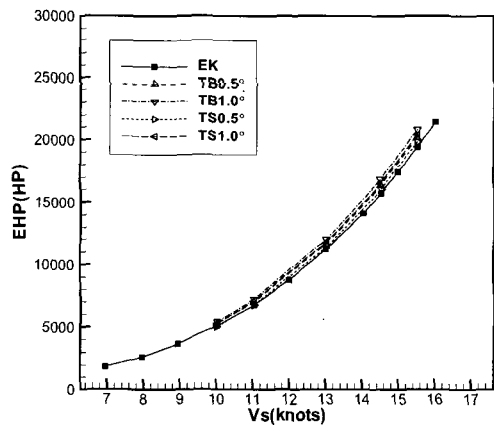


Fig. 4 Comparison of EHP (2D Extrapolation) at various trimmed condition

Table 4 Comparison of EHP (Vs=15.5 knots) at various trimmed condition

초기조건	EHP2D(HP)	(%)
Even keel	19411.5	100.0
Trim Bow 0.5°	20145.1	103.8
Trim Bow 1.0°	20812.0	107.2
Trim Stern 0.5°	19817.2	102.1
Trim Stern 1.0°	20394.0	105.1

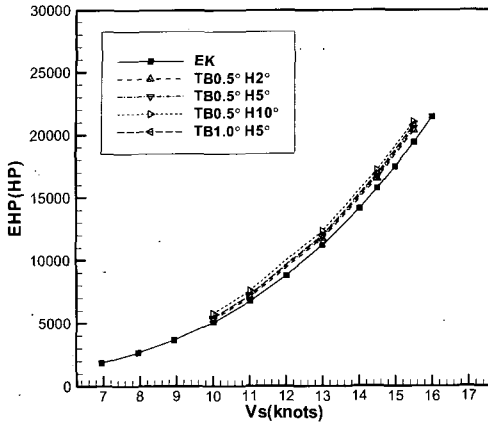


Fig. 5 Comparison of EHP (2D Extrapolation) at various heeled and trimmed condition (1)

Table 5 Comparison of EHP (Vs=15.5 knots) at various heeled and trimmed condition (1)

초기조건		EHP2D(HP)	(%)
Heel	Trim		
0°	0°	19411.5	100.0
2°	-0.5°	20354.7	104.9
5°	-0.5°	20512.3	105.7
10°	-0.5°	21015.6	108.3
5°	-1°	20767.4	107.0

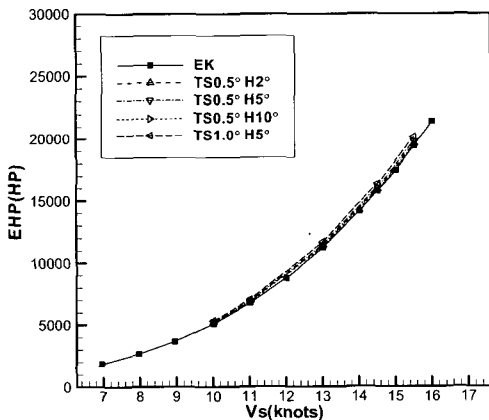


Fig. 6 Comparison of EHP (2D Extrapolation) at various heeled and trimmed condition (2)

Table 6 Comparison of EHP (Vs=15.5 knots) at various heeled and trimmed condition (2)

초기조건		EHP2D(HP)	(%)
Heel	Trim		
0°	0°	19411.5	100.0
2°	0.5°	19545.0	100.7
5°	0.5°	19796.4	102.0
10°	0.5°	19463.3	100.3
5°	1°	20136.6	103.7

Table 7 Comparison of form factor(1+k) at various condition

초기조건		1+k	초기조건		1+k
Heel	Trim		Heel	Trim	
0°	0°	1.118	2°	-0.5°	1.139
2°	0°	1.128	5°	-0.5°	1.146
5°	0°	1.120	10°	-0.5°	1.166
10°	0°	1.141	5°	-1°	1.151
0°	-0.5°	1.135	2°	0.5°	1.124
0°	-1°	1.151	5°	0.5°	1.125
0°	0.5°	1.120	10°	0.5°	1.119
0°	1°	1.137	5°	1°	1.133

Table 7은 선체의 초기 경사가 점성저항성분에 주는 영향을 조사하기 위하여 앞서 수행된 여러 가지 선체경사의 초기조건에서 수행된 저항시험에서 3차원 외삽법으로 추정된 형상계수(1+k)를 나타낸 것이다. 모형선의 축척비가 1/100이나 되어, 모형선의 길이가 3.2m에 불과해 난류촉진이 완전히 이루어지지 못해 형상계수가 통상적인 실험결과보다 다소 작게 추정된 것으로 보인다. 따라서 이러한 형상계수를 실선의 유효동력을 추정하는데 사용하는 것은 부적절하지만, 선체의 자세 변화가 점성저항 성분에 주는 영향을 상대적으로 비교하는 데에는 충분히 사용될 수 있는 것으로 생각된다.

Table 7을 살펴보면 선수트림이 있는 경우 형상계수가 최대 4.3% 정도로 상당히 증가하고 있다. 대형유조선 같은 낮은 Froude 수에서 운항하는 조파저항이 상대적으로 작은 선박에서 벌브는 밑지 부분의 박리현상을 줄여주는 효과가 있다고

밝혀져 있으며(Lewis 1988), 선체의 트림에 의해 선수 벌브의 깊이방향 위치가 변화하므로 인해 벌브의 밑지 부분의 박리현상에 대한 감소효과가 줄어들어 형상저항을 증가시키는 것으로 생각된다.

3.2 저항시험

Table 8 및 Table 9는 설계속도에서의 전달동력 및 여러 저항계수들을 나타낸 것이다. Table 8의 저항 및 저항시험의 결과를 살펴보면 선체가 경사상태에 있을 때 선체가 경사가 없는 상태일 때보다 선체의 저항이 최대 7.2% 정도로 크게 증가하였음을 볼 수 있고, 경사가 없는 정상 상태일 때보다 2차원 방법으로 해석한 전달동력(DHP)이 우현 5° 경사일 때 1.4%, 선수 1° 경사일 때 12.6%, 선미 1° 경사일 때 5.4%, 우현 5° 경사와 선수 1° 경사가 동시에 일어났을 때 8%, 우현 5° 경사와 선미 1° 경사가 동시에 일어났을 때 7.8% 증가하였다.

Table 9에서 모형선의 유효반류계수( $1 - w_M$ )를 살펴보면 횡경사 및 선수트림이 있는 경우 선미부의 유속이 감소하고 있으며, 선미트림의 경우에는 선미부 유속이 증가하고 있다. 이는 다음절에서 보여줄 프로펠러 유입면에서의 반류계측 결과와도 그 경향이 일치하고 있다. 또한 선미부 유속이 감소할수록 추력감소현상도 크게 나타나고 있으며, 추진기 단독효율( $\eta_O$ )도 낮아지고 있다. 선박의 추진성능에 대한 선체의 자세변화의 영향은 설계속도 근처에서 최대 약 12.6%의 전달동력 증가로 나타났다.

Table 8 Comparison of EHP, DHP (Vs=15.5 Knots)

초기조건		EHP 2D	(%)	DHP 2D	(%)
Heel	Trim	(HP)		(HP)	
0°	0°	19411.5	100.0	27298.9	100.0
5°	0°	19654.2	101.3	27677.6	101.4
10°	0°	19876.4	102.4	27877.1	102.1
0°	-1°	20812.0	107.2	30741.9	112.6
5°	-1°	20767.4	107.0	29481.6	108.0
0°	1°	20394.0	105.1	28764.3	105.4
5°	1°	20136.6	103.7	29439.7	107.8

Table 9 Comparison of self-propulsion Factors (2D Extrapolation, Vs=15.5 Knots)

초기조건		$N_s$	$1-t$	$1-w_M$	$\eta_O$	$\eta_H$	$\eta_D$
Heel	Trim	(rps)					
0°	0°	77	0.921	0.650	0.587	1.156	0.706
5°	0°	76	0.875	0.600	0.578	1.168	0.706
10°	0°	77	0.902	0.624	0.583	1.164	0.709
0°	-1°	77	0.798	0.544	0.548	1.174	0.673
5°	-1°	77	0.851	0.550	0.564	1.189	0.701
0°	1°	78	0.904	0.640	0.583	1.156	0.705
5°	1°	80	0.921	0.747	0.588	1.107	0.680

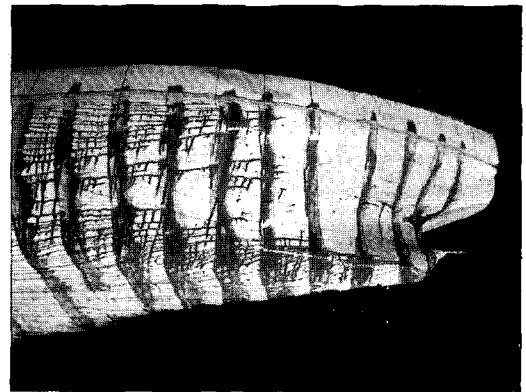


Fig. 7 Limiting streamlines (Portside)

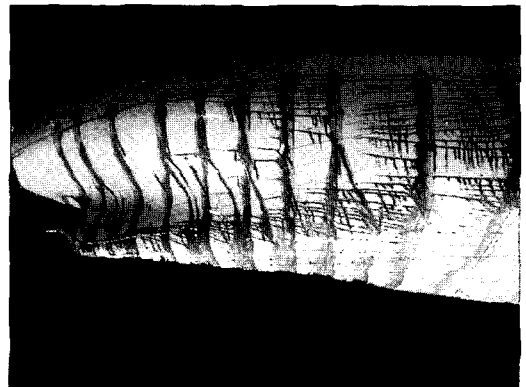


Fig. 8 Limiting streamlines (Starboard)

3.3 한계유선관측

Fig. 7 ~ 8은 유막법을 사용하여 2° 횡경사인 조건에서 선미부의 한계유선을 관측한 결과이다.

한계유선을 살펴보면 좌, 우현 쪽 모두에서 bilge를 따라서 separation line이 뚜렷하게 나타나고, 큰 차이는 없으나 우현 쪽에 더 큰 빌지 보오텍스가 생성되는 징후가 나타나고 있는 것으로 생각된다.

3.4 선체의 자세변화

선체의 초기 자세변화가 항주중의 자세변화에 어떠한 영향을 주는지 살펴보기 위하여, 저항시험 시 선체의 선수, 선미 흘수 변화량 및 선체의 침하량을 함께 계측하여 보았다. 선체의 항주중의 자세변화는 횡경사에는 영향을 받지 않으며 Fig. 9에 보인 바와 같이 초기에 선수트림이 있는 경우 항주중의 트림양이 더 증가하며, 초기에 선미트림이 있는 경우 항주중의 트림양이 더 감소하는 형태로 초기 트림상태에 의해서만 영향을 받음을 알 수 있다.

3.5 선체반류계측

선체의 자세 변화에 따른 선미부 유동장의 변화를 알아보기 위하여 프로펠러 유입면(St. 0.35)에서의 선체 반류를 계측하였다. 계측 중에 선체의 자세변화가 일어나지 않게 선체의 움직임을 구속 시킨 상태(김우전 등 2000)에서 선체의 경사가 없는 정상 상태와 우현 쪽으로 5° 횡경사진 상태일 때, 선수 또는 선미 트림 1°와 우현 쪽으로 5° 횡경사가 동시에 있는 경우에 대해 프로펠러 반경의 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1이 되는 위치에서 15° 간

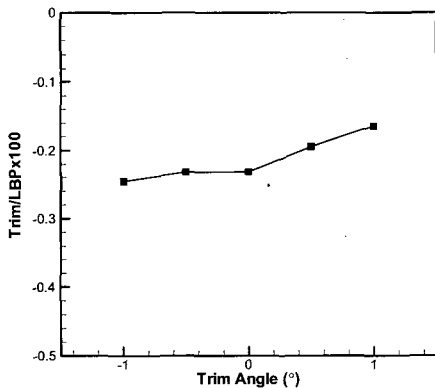


Fig. 9 Comparison of trim displacement

격으로 5공 피토관(김우전 등 1997, 양지만 등 2000)을 사용하여 유속을 계측하였다.

프로펠러 유입면에서의 유속계측결과는 Fig. 10 ~ 13에 나타내었다. 계측결과를 나타내기 위하여 x는 우현을, y는 수직 상방을 양(+)의 값으로 나타내었으며, 좌표계의 원점은 프로펠러축의 중심에 위치하며, 계측 위치는 프로펠러의 직경(D=0.098m)으로 무차원화 하였다. 또한, 결과의 해석 및 비교를 용이하게 하기 위해서 자유수면에 대하여 고정된 좌표계가 아닌, 선체에 고정되어 선체의 자세변화에 따라 선체와 함께 이동되는 좌표계에 나타내었다.

Table 10 및 11은 각 조건에서의 선체반류계측 결과를 각 반경에서 원주방향으로 평균값을 구한 것을 나타낸 것이다. 선수트림의 경우 프로펠러 유입면에서 유동의 축방향 속도 성분의 평균값이 감소하며, 선미트림의 경우에는 축방향 속도 성분이 증가함을 볼 수 있다.

Table 10 Circumferential mean values of measured axial velocity (Vs=15.5 knots)

r/R	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	Mean
1-w, Evenkeel	0.091	0.193	0.282	0.506	0.643	0.424
1-w, H5°	0.076	0.238	0.256	0.503	0.612	0.413
1-w, TB1° H5°	0.033	0.237	0.205	0.458	0.585	0.379
1-w, TS1° H5°	0.079	0.239	0.301	0.569	0.640	0.449

Table 11 Circumferential mean values of measured lateral velocity (Vs=15.5 knots)

r/R	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	Mean
V <sub>l</sub> /V, Evenkeel	0.157	0.074	0.118	0.102	0.092	0.082
V <sub>l</sub> /V, H5°	0.089	0.118	0.139	0.112	0.106	0.090
V <sub>l</sub> /V, TB1° H5°	0.074	0.120	0.126	0.105	0.094	0.084
V <sub>l</sub> /V, TS1° H5°	0.134	0.132	0.142	0.119	0.106	0.098

**EVEN KEEL**

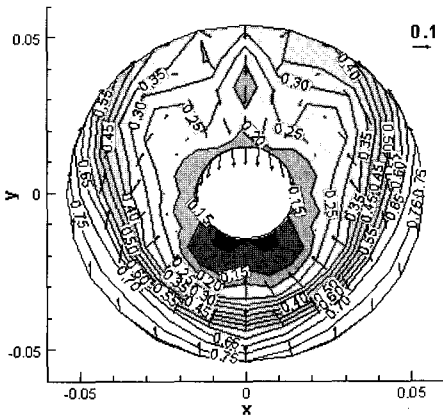


Fig. 10 Axial velocity contours at propeller plane (Evenkeel, Vs=15.5 Knots)

**Trim Bow 1° Heel 5° CW**

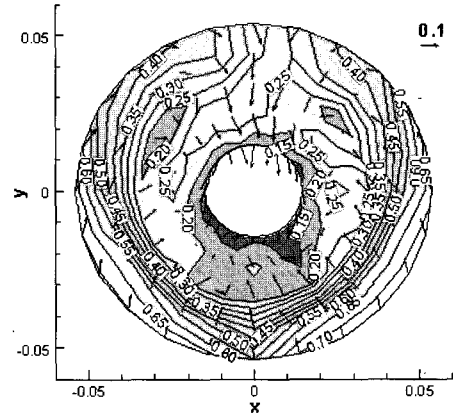


Fig. 12 Axial velocity contours at propeller plane (Trim Bow 1°, Heel 5°, Vs=15.5 Knots)

**Heel 5° CW**

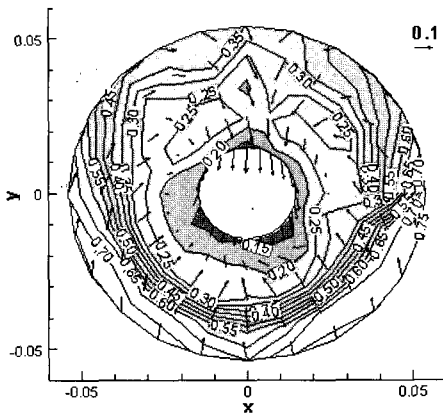


Fig. 11 Axial velocity contours at propeller plane (Heel 5°, Vs=15.5 Knots)

**Trim Stern 1° Heel 5° CW**

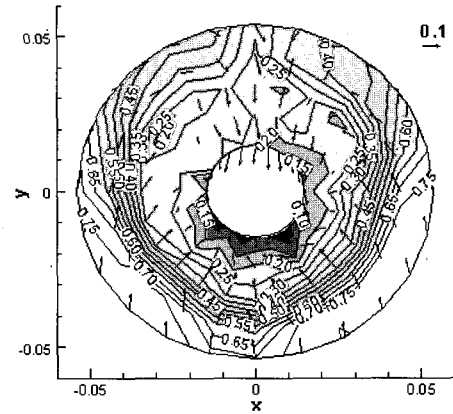


Fig. 13 Axial velocity contours at propeller plane (Trim Stern 1°, Heel 5°, Vs=15.5 Knots)

#### 4. 결론

대형 원유운반선으로 사용되는 저속비대선형의 선체의 일부가 손상돼 침수되어 횡경사와 트림이 발생한 상태를 가상하여 선체의 자세변화가 선체 주위의 유동현상과 저항 및 추진성능에 미치는 영향을 실험 및 수치계산을 통하여 알아보려고 하였

다. 횡경사 및 트림이 일어난 상태에서의 저항 성능 추정시험, 자항성능 추정시험 및 반류계측을 실시하였다. 본 연구의 결과는 선체의 자세변화가 선체주위의 유동현상과 저항추진성능에 미치는 영향에 대한 기초적인 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

추가로 CFD를 통하여 경사가 없는 상태와 횡

경사 및 트림 상태에서의 유동현상을 연구할 계획이다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터(ASERC)에 의해 지원되었음을 밝힙니다.

### 참 고 문 헌

- 김우전, 김도현, 윤현세, 문덕용, 반석호, 1997, "반류 계측용 5공 피토판의 캘리브레이션 방법에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 34권, 제 2호, pp. 11-19.
- 김우전, 반석호, 김도현, 이춘주, 2000, "선미선형을 변화시킨 두 척의 KRISO 300K VLCC 모형주위의 유동과 저항추진 특성에 대한 실험적 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 3호, pp. 11-20.
- 양지만, 이승재, 김효철, 서정천, 박영민, 2000, "비대선에서 프로펠러와 선체와의 상호작용에 대한 Pre-swirl Stator Vane의 효과에 관한 연구," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 188-191.
- 양지만, 김효철, 2003, "경사상태에 있는 비대선의 저항추진 성능추정," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 216-221.

- 양지만, 김효철, 이재규, 반석호, 김진, 박일룡, 2004a, "자세변화가 비대선 주위의 유동현상과 저항성능에 미치는 영향 해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 306-314.
- 양지만, 김효철, 이신형, 2004b, "자세변화가 비대선의 저항추진성능에 미치는 영향 해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 78-84.
- Lewis, E.V., 1988, Principles of Naval Architecture, Vol. 2, SNAME
- Yang, J.M., Rhee, S.H., Lee, J.K. and Kim, H., 2004, "Evaluation of Propulsive Performance of a Tanker in Damaged Conditions," Hydrodynamics VI, ICHD2004, pp. 159-165.



< 양 지 만 >



< 김 효 철 >