

대형유조선의 저항추진성능에 미치는 자세변화의 영향에 관한 연구

양지만^{†*}, 이신형^{**}, 김효철^{***}

현대삼호중공업 선박해양연구소^{*}
Fluent Inc.^{**}

서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소^{***}

A Study on the Effect of the Heeled and Trimmed Conditions on Propulsive Performance of VLCC

Jiman Yang^{*}, Shin Hyung Rhee^{**} and Hyochul Kim^{***}

Ship and Ocean Research Dep't., Hyundai Samho Heavy Industries Co., Ltd.^{*}
Fluent Inc.^{**}

RIMSE, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, SNU^{***}

Abstract

In recent years, many environmentally disastrous maritime accidents resulted from oil or fuel spills from damaged vessels. The situation becomes worse especially when the early counter treatment is not prompt enough. To properly handle this type of accidents and prevent further disasters, the propulsive performance of damaged vessels must be better understood for salvage operations, as well as for containing oil spills while the vessels are being towed or self-propelled. Until now, many hydrodynamic studies have focused on the propulsive performance of undamaged vessels but only a few studies on that of damaged vessels. In this paper, both experimental and computational methods are used to study the propulsive performance of a VLCC in heeled and/or trimmed conditions. For experimental studies, measurement systems should be modified to adapt to the variations of attitude of a damaged vessel. For numerical studies, CFD programs should be also extended to be applied to asymmetrically floating conditions.

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

1. 서론

지금까지 저속비대선의 저항추진성능에 대한 연구는 정상적으로 낮은 Froude 수에서 운항할 때의 저항추진성능을 실험적으로 추정하는데 초점을 두어 왔다. 그러나 세계적으로 해양사고가 끊이지 않고 있어서(박용철 1992), 사고선박을 처리하는데 따르는 유체역학적 성능을 파악하는 문제가 새로운 과제가 되고 있다. 예컨대, 대형원유운반선 사고로 비정상적인 자세를 갖게 되었을지라도 저항 또는 예인하여 안전한 위치로 이동하는 것이 기름유출로 인한 환경오염을 최소화하는데 도움이 될 지를 판단하려면 손상된 선체에 작용하는 유체역학적 특성(저항성능, 운동성능 등)이 주요한 자료가 된다. 그러나 대형선박이 정상적인 자세로 저속 항주하는 조건에서 저항추진성능을 실험적으로 추정하는 것도 최근에야 신뢰성을 인정받게 되었으며, 선박이 손상되어 과도한 트림이나 횡경사를 일으킨 상태일 때는 실험적으로나 이론적으로 정립된 방법이 없다.

선체가 비정상적인 자세로 떠 있는 상태에서는 선체의 자세에 적합한 계측기기가 새롭게 마련되어야 할뿐 아니라, 효과적인 계측기기의 배치방법도 충분히 검토되어야 한다(양지만과 김효철 2003, 양지만 등 2004). 이론적인 계산도 현재까지의 수치 유체역학적 방법은 대부분의 연구가 선박이 가지는 대표적 특징인 대칭성을 활용하는 것을 전제로 해석법이 정의되어 있을 뿐 비대칭상태에 대한 수치해석방법은 아직 충분히 정립되어있지 못하다.

본 논문에서는 저속비대선에 횡경사와 트림이 발생하여 비대칭 자세로 떠있는 비정상적인 상태에 적합한 새로운 실험기법(양지만 2005)을 이용하여 선체의 저항추진성능을 실험적으로 확인해보고자 하였다. 또, 선체에 횡경사와 트림이 발생한 상태에서 비대칭조건을 고려한 수치계산을 수행하여 실험결과의 검토에 사용할 수 있도록 하였다.

2. 모형시험

실험대상으로는 KTTC 공동연구의 공시 선형인

KRISO 300K VLCC를 선정하였으며, 1/100 축척비의 선체모형 및 프로펠러 모형을 사용하였다(양지만과 김효철 2005).

저속비대선에 횡경사와 트림이 발생되었을 때의 저항추진성능을 실험적으로 확인하려면 횡경사각의 변화로 트림가이드와 동력계의 고정점 위치가 연직면으로부터 벗어나더라도 사용할 수 있도록 기기를 횡방향으로 이동 배치할 수 있어야 한다. 연직면으로 모형선을 구속하는 장치의 기구학적 거동에 적합한 모형선 구속기구를 고안하여 선체에 횡경사와 트림이 발생한 상태에서 저항시험, 저항시험 및 선체반류계측을 실시하여 비정상상태에 있는 선박의 추진성능을 추정하였다. 기기의 이동 배치법과 모형선 구속 장치는 참고문헌(양지만과 김효철 2005, 양지만 2005)에 수록되어 있다.

2.1 저항시험

저속비대선에 횡경사와 트림이 발생되었을 때의 저항성능을 실험적으로 확인하기 위하여 다음과 같이 선박의 초기자세가 변화된 상태에서 저항시험을 수행하였다. 선체의 경사가 없는 정상상태일 때, 선체가 우현 쪽으로 $1^\circ \sim 5^\circ$ 및 10° 횡경사진 상태, 선수 또는 선미트림이 0.5° 및 1° 인 상태, 2° , 5° 및 10° 의 횡경사와 0.5° 의 트림이 동시에 일어난 상태, 5° 의 횡경사와 1° 의 트림이 동시에 일어난 상태일 때를 초기항주자세로 하여 저항시험을 수행하였다. 선체의 횡경사와 트림이 저항성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 저속비대선형이지만 2차원 방법으로 유효동력을 추정하였으며, 점성저항성분의 변화를 3차원 외삽법으로 구해진 형상계수($1+k$)로 추정해보았다.

2.2 저항시험

횡경사와 트림상태가 저속비대선형의 추진성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 선체의 경사가 없는 정상상태, 선체가 우현 쪽으로 5° 및 10° 횡경사진 상태, 선수 또는 선미트림이 1° 인 상태, 10° 의 횡경사와 1° 의 트림이 동시에 일어난 상태 등을 선체의 초기 자세로 하는 조건에 대해서

자항시험을 수행하였다. 저항시험의 결과와 같은 조건에서 선체의 횡경사와 트림이 자항성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 저속비대선형이지만 2차원의 방법으로 전달동력을 추정하였다.

2.3 반류계측시험

선체의 자세변화에 따른 선미 유동장의 변화를 알아보기 위하여 프로펠러 면(St. 0.35)에서의 반류분포를 선체의 자세변화가 일어나지 않도록 선체를 구속시키고(김우전 등 2000a) 경사가 없는 정상상태에서 실험을 실시하였다. 또한 자세변화가 일어난 상태로서는 우현 쪽으로 5° 횡경사진 상태일 때, 선수 또는 선미트림 1°가 발생되었을 때, 그리고 1°의 선수 또는 선미트림에 더하여 우현 쪽으로 5° 횡경사가 동시에 발생되었을 때를 선정하였다. 이들 상태에 대하여 프로펠러 반경의 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1인 반경 위치에 5공피토관을 설치하고 프로펠러축을 중심으로 15° 간격으로 회전시켜가며 유속분포를 계측하였다.

3. 수치계산

국내 여러 기관을 비롯하여 세계적으로 널리 쓰이는 수치유체역학 소프트웨어인 Fluent 프로그램으로 난류유동을 해석하여 그 결과를 검토하였다. 사용된 Fluent 프로그램의 버전은 6.1.22이며, 난류모형은 $k-w$ 를 사용하였다. 자세한 수치계산 방법은 참고문헌(Kim/Rhee 2002)에 기술하였다.

수치계산에서 기본 좌표계는 선수방향을 음(-)의 X방향, 선체의 우현을 양(+)의 Y방향, 그리고 연직 상방을 양(+)의 Z방향으로 하는 직교좌표계를 사용하였다. 선속이 충분히 낮아서 이중모형 근사를 채택하였으므로 자유수면이 제거되었다. 선체의 경사가 없는 정상상태와 우현 쪽으로 5° 및 10°의 횡경사진 상태일 때, 선수 또는 선미트림이 1°인 상태일 때, 선수 또는 선미트림 1°와 우현 쪽으로 5° 횡경사가 동시에 일어난 상태에 대해 수치해석을 하였다. 이때의 Reynolds 수는 모형시험일 때와 같은 2.02×10^6 을 사용하였다. 횡경사로 인하여 선체가 연직면에 대하여 좌우 비대칭 형상으로 바뀌므로 전폭에 걸쳐서 격자계를

생성하였으며, 트림에 따라 선수벌브 및 선미 트림섬의 잠김 조건이 바뀌므로 격자배치를 다르게 하였다. 선체와 그 주위 유동장에 총 64만개의 격자를 사용하였다. 벽함수를 사용하여 벽면 근처의 속도분포를 추정하기 위해, 첫 번째 격자점은 무차원 거리값 $y^+ = 45$ 정도에 놓이도록 하였다(한국해양연구소 1999, 김우전 등 2000b, Kim et al. 2002, 박일룡 등 2003).

4. 결과의 검토

4.1 횡경사의 영향

통상적으로 횡경사가 발생하면 물에 잠긴 선체 형상은 비대칭 형상이 되고 잠긴 쪽의 선형은 뭉툭하게 바뀌므로 형상의 변화는 조파저항의 증가의 원인이 되며 많은 경우에 침수표면적의 증가가 동반된다. 또한 유동의 박리현상이 나타날 만큼 더욱 불리하게 경계층이 발달되어 점성저항도 증가될 것으로 기대된다(Lewis 1988). 그러나 본 연구의 실험에서는 횡경사가 일어났을 때 횡경사로 인한 유효동력의 증가는 그다지 크지 않다.

Table 1과 같이 설계속도 근처에서 횡경사가 10° 이면 최대 약 2.4%정도 유효동력이 증가하였

Table 1 Relation between heel and EHP at calm water condition ($V_S = 15.5knots$)

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

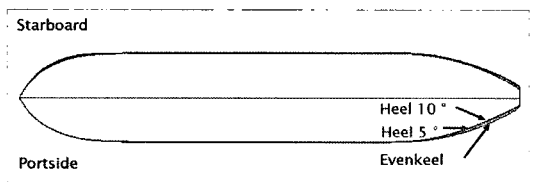


Fig. 1 Shapes of waterplane in various heeled conditions

Table 2 Relation between heel and viscous drag coefficients ($V_S = 15.5knots$)

Heel	Trim	Measurement		Computation	
		Re ($\times 10^6$)	C_{VM} ($\times 10^{-3}$)	Re ($\times 10^6$)	C_{VM} ($\times 10^{-3}$)
		C_{TM} ($\times 10^{-3}$)	$1 + k$		
0°	0°	2.02	4.525	2.02	4.665
		4.674	1.118		
5°	0°	1.99	4.549	2.02	4.634
		4.716	1.120		
10°	0°	1.88	4.682	2.02	4.633
		4.783	1.141		

Table 3 Relation between trim and EHP at designed ship speed ($V_S = 15.5knots$)

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

다. 비대선형이고 경사각이 작아서 Fig. 1과 같이 횡경사에 따르는 선수부 수선면의 형상변화도 작아서 횡경사로 인한 선체저항의 증가도 작다.

또한, Table 2에 나타난 저항성분의 수치계산결과를 살펴보다더라도 횡경사에 의해서는 선체점성저항은 거의 변화하지 않는 것으로 나타나고 있다.

4.2 트림의 영향

다음으로, Table 3은 선체가 초기에 0.5° 및 1°의 선수 또는 선미트림이 일어난 상태일 때의 유효동력을 추정한 결과를 나타낸 것이다. 트림의 영향은 선수트림이 일어났을 때, 설계속도 근처에서 최대 약 7.2%의 유효동력 증가로 나타났다.

선체저항에 대한 트림의 영향을 살펴보면 선미트림이 일어났을 때에도 유효동력이 증가하고 있으나, 선수트림이 일어났을 때 더 큰 폭으로 유효동력이 증가하고 있다. 한편 트림으로 인한 수선면의 형상변화는 Fig. 2와 같다.

Table 4에서는 편의상 선수트림을 음(-)의 값으로, 선미트림을 양(+)의 값으로 표기하고, 트림이 저항성능에 미치는 영향을 수치계산하여 표기

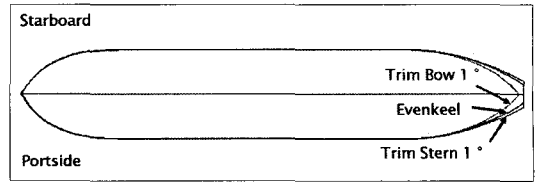


Fig. 2 Shapes of waterplane in different trimmed conditions

Table 4 Relation between trim and viscous drag coefficients ($V_S = 15.5knots$)

Heel	Trim	Measurement		Computation	
		Re ($\times 10^6$)	C_{VM} ($\times 10^{-3}$)	Re ($\times 10^6$)	C_{VM} ($\times 10^{-3}$)
		C_{TM} ($\times 10^{-3}$)	$1 + k$		
0°	1°	1.98	4.723	2.02	4.845
		4.783	1.137		
0°	0°	2.02	4.525	2.02	4.665
		4.674	1.118		
0°	-1°	1.98	4.677	2.02	4.695
		4.845	1.151		

하였다.

일반적인 상선선형에 초기 선미트림이 일어나면, 낮은 속도구간에서는 저항의 증가가 나타나지만 고속구간에 이르러서는 저항을 감소시킨다. 저속일 때 선미의 침하는 선미형상을 더욱 뚜렷하게 만들어주는 효과를 가지게 되어 형상저항과 박리저항을 증가시키며, 고속구간에서는 이러한 저항의 증가보다는 트림된 상태에서 물가름각이 적어져서 조파저항이 줄어드는 양이 더 크기 때문에 저항이 줄어든다고 알려져 있다(Lewis 1988). 그러나 본 논문의 대상선형인 KVLC1의 경우에는 설계속도가 Froude 수로 0.142에 해당하는 매우 느린 선박이며, Fig. 2의 트림 상태에서 수선면을 살펴보면 선수부에서는 거의 변화가 없으므로, 선미트림이 조파저항의 감소보다는 형상저항과 박리저항의 증가효과로 인한 영향이 선체저항에 더욱 크게 나타나는 것으로 생각된다. 그리고 대형유조선과 같은 낮은 Froude 수에서 운항하는 조파저항이 상대적으로 작은 선박에서 별다른 밑지 부분의 박리현상을 줄여주는 효과가 있다고 밝혀져 있다(Lewis 1988). 선체에 트림이 발생되면 밑지 부

Table 5 Comparison of EHP at various hull attitude ($V_S = 15.5knots$)

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

본에서 박리가 일어나기 쉬워지는 방향으로 유동이 유입되고, 선수 벌브의 깊이방향 위치가 변화함으로 인해 밑지 부분에서 박리현상으로 인한 형상저항을 증가시켜 선수트림이 일어나면 선체저항을 증가시키는 것으로 생각된다.

4.3 횡경사 및 트림의 복합영향

Table 5 는 선체가 초기에 0.5°의 선수 또는 선미트림과 2°, 5° 및 10°의 횡경사가 동시에 일어났을 때의 유효동력을 추정한 것이다. 편의상 우현의 건현이 감소할 때를 양(+)의 횡경사로, 선수 건현이 증가하면 양(+)의 트림으로 하였다.

선체의 자세변화가 선수트림을 동반하는 경우 저항의 증가가 두드러진다. 선체에 트림이 발생한 후 횡경사가 나타나는 경우를 살펴보자. Table 5 에서 -0.5° 트림이 발생하고, 다시 횡경사가 2°, 5° 및 10°로 변화하면 유효동력은 기준상태보다 4.9%, 5.7% 그리고 8.3% 증가하고 있다.

횡경사가 5°일 때 유효동력은 트림이 -0.5°일 때 5.7% 증가하던 것이 트림이 -1°로 바뀌면 7.0% 증가로 바뀌고 있다. 양의 트림이 발생하는 경우에도 같은 경향이 나타난다. 따라서 선박의 자세와 유효마력을 알고 자세변화에 따르는 저항 변화율을 알면 그리 크지 않은 자세변화가 생긴 상태에 대한 유효동력의 추정이 가능할 것으로 판단된다. 트림과 횡경사가 없는 초기의 정상상태로부터 2°의 횡경사가 발생하면 유효동력의 증가는 1.2%인 것으로 나타난다. 또 초기 정상상태로부터 0.5°의 트림이 발생하면 2.1%의 저항증가가 나타

Table 6 Comparison of viscous drag in various hull attitude ($V_S = 15.5knots$)

Heel	Trim	Measurement		Computation	
		Re ($\times 10^6$)	C_{VM} ($\times 10^{-3}$)	Re ($\times 10^6$)	C_{VM} ($\times 10^{-3}$)
		C_{TM} ($\times 10^{-3}$)	$1+k$		
5°	1°	1.88	4.649	2.02	4.761
		4.828	1.133		
5°	0°	1.99	4.549	2.02	4.634
		4.716	1.120		
5°	-1°	1.88	4.617	2.02	4.688
		4.884	1.151		

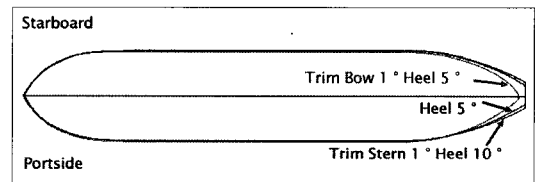


Fig. 3 Shapes of waterplane areas in various hull attitude

난다. 따라서 앞의 논리라면 2°의 횡경사와 0.5°의 트림이 동시에 발생되었다면 저항증가는 3.3%로 나타나야 하는데 실험결과에서는 0.7%에 불과한 것으로 나타나고 있다. 이는 횡경사와 트림이 상호작용을 일으키는데 따르는 영향이다. 어느 정도 이상의 자세변화가 있을 때에는 영향을 실험적 혹은 계산적으로 확인하는 것이 필요하다. 수치계산결과는 Table 6에, 자세변화에 따른 수선면의 변화는 Fig. 3에 나타내었다.

4.4 형상저항의 변화

Table 7은 선체의 여러 가지 초기 자세가 정성 저항성분에 주는 영향을 조사하기 위하여 저항시험을 실시하고 3차원 외삽법으로 추정된 형상계수 ($1+k$)를 보인 것이다.

모형선의 축척비가 1/100인 모형선의 길이는 3.2m이고 예인속도가 느려서 난류촉진이 완전히 이루어지지 못하여 형상계수가 통상적인 실험결과보다 다소 작게 추정된 것으로 보인다. 이러한 형상계수를 선체의 자세변화가 정성저항에 미치는 영향을 비교하는 목적으로만 뜻을 두기로 하였다.

Table 7을 살펴보면 선수트림이 있는 경우 형

Table 7 Comparison of form factor(1+k) at various initial attitude of hull

Attitude		1+k	Attitude		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 8 Comparison, of drag coefficients in various initial attitude of hull ($V_G = 15.5knots$)

Heel	Trim	C_w ($\times 10^{-3}$)	C_{VM} ($\times 10^{-3}$)	$\frac{\Delta C_w}{\Delta C_{TM}}$ (%)	$\frac{\Delta C_{VM}}{\Delta C_{TM}}$ (%)
0°	0°	0.1491	4.525	0.0	0.0
5°	0°	0.1671	4.549	42.9	57.1
10°	0°	0.1004	4.682	-45.0	145.0
0°	-1°	0.1614	4.677	7.5	92.5
0°	1°	0.1765	4.617	22.9	77.1
5°	-1°	0.1612	4.723	5.8	94.2
5°	1°	0.1491	4.643	0.0	100.0

상계수가 최대 4.3% 정도로 증가하는 것으로 나타나 있다. 대형유조선은 낮은 Froude 수에서 운항하여 조파저항이 상대적으로 작기 때문에 벌브는 조파저항을 줄여주는 효과보다는 밑지 부분의 박리현상을 줄여주는 효과가 더욱 크다고 밝혀져 있다(Lewis 1988). 선체의 트림에 의해 벌브의 잠기는 깊이의 변화로 인한 박리현상이 증가하여 형상저항을 증가시키는 것으로 생각된다.

4.5 조파저항의 변화

Table 8은 선체의 초기 경사가 조파저항성분에 주는 영향을 조사하기 위하여 앞서 여러 가지 선체 자세 변화가 일어난 상태를 초기조건으로 하여 수행된 저항시험에서 추정된 조파저항계수(C_w)를 나타낸 것이다.

앞서 4.4절에서 추정된 형상계수(1+k)가 축척 영향으로 인해 통상적인 저속비대선의 실험결과보다 다소 작게 추정되어, 조파저항계수 또한 정량

적인 값으로 신뢰하기 어려우나 정성적으로는 정보를 얻을 수 있다고 판단된다. 조파저항성분은 저항계수 측면에서 실선기준으로 설계속도 근처에서 전 저항의 10%이내에 불과하다. Table 8의 자세변화로 인한 조파저항의 변화를 살펴보면 같은 상태에서 얻어지는 전저항 변화량의 6%~43% 정도를 차지하고 있어서, 점성저항으로 인한 변화량이 저항변화를 주도하고 있는 것으로 나타났다.

횡경사는 수선면의 형상을 변화시켜 조파저항의 변화로 이어질 것으로 기대되었지만 수선면의 형상변화가 크지 않은 것이 확인되었다. 5°의 횡경사가 일어났을 때 형상저항과 조파저항이 거의 비슷한 비율로 증가하는 것이 확인 되었으나, 10°의 횡경사가 일어났을 때에는 저항의 증가가 대부분 형상저항에 기인하고 있음이 확인되었다.

선수트림이 일어나면 선수벌브의 위치변화로 조파저항의 변화가 기대되나 실제로는 형상저항의 변화가 더 큰 것으로 나타났으며, 선미부 수선면의 형상이 트란섬 형태에서 세장형으로 바뀌는데 따르는 영향보다 선수부의 영향으로 인한 저항증가가 요인이 더 큰 것으로 나타났다.

선미트림의 경우에는 일반적으로 선미형상이 더욱 뚜렷하게 변화되어 형상저항이 증가하고, 선수부의 물가름각이 감소하여 조파저항이 감소하는 것으로 알려져 있다(Lewis 1988). 실제로 형상저항의 증가에 기인하여 대부분의 저항의 증가가 이루어졌다. 그러나 선수부 수선면의 형상이 거의 변화가 없음에도 불구하고 조파저항 성분이 증가하는 것은 선수벌브의 잠김 깊이가 알아지면서 벌브가 조파저항에 미친 나쁜 영향 때문이다.

트림과 횡경사가 함께 존재하면 트림과 횡경사의 영향이 상호작용으로 인해 트림만 발생했을 때보다 조파저항이 감소하는 현상이 나타나고 있다.

4.6 항주중의 자세변화

Fig. 4는 선체의 초기자세 변화가 항주중의 트림의 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 연구대상 선형은 저속비대선형이므로 그 항주 속도가 느려 선체표면 압력분포의 변화가 크지 않아서 상대적으로 침하는 거의 없는 것으로 보인다. 항주중의 트림 변화는 초기의 자세변화 중에서 횡경사

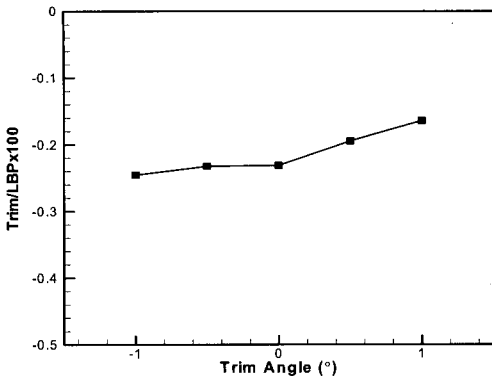


Fig. 4 Effect of hull attitude on trim

Table 9 Comparison of EHP, DHP ($V_S = 15.5knots$)

Attitude		EHP 2D (HP)	(%)	DHP 2D (HP)	(%)
Heel	Trim				
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

에는 영향을 거의 영향을 받지 않는다. 초기에 선수트림이 있으면 항주중의 트림양이 더 증가하며, 초기에 선미트림일 때는 항주중의 트림양이 더 감소하는 형태로, 항주중의 선체의 자세변화는 초기의 트림상태의 영향을 받고 있는데, 선수트림이면 선수부분의 압력이 감소하고 선미부분의 압력이 증가한다. 선미트림일 때는 선수부분의 압력이 증가하고 선미부분의 압력이 감소하여 항주중의 자세변화가 나타나는 것으로 생각된다.

4.7 저항성능에 미치는 영향

Table 9 및 Table 10은 선체의 초기 자세변화에 따른 설계속도($V_S = 15.5knots$)에서의 전달동력 및 여러 저항계수들을 나타낸 것이다.

Table 9의 저항 및 저항시험의 결과를 살펴보면 선체가 경사되면 선체가 경사되지 않았을 때보다 저항 및 전달동력(DHP)이 증가하며 1°의 선

수트림이 있으면 경사가 없을 때보다 7.2% 정도 유효동력이 증가하고, 전달동력은 12.6%증가한다.

Table 10에서 모형선의 유효반류계수($1 - w_M$)를 살펴보면, 횡경사 및 선수트림이 발생되면 선미부에서 유속이 감소하고 있으며, 선미트림이 발생되었을 때에는 선미부에서 유속이 증가한다.

선체에 횡경사가 발생하면, 물에 잠긴 부분의 선체형상은 비대칭 형상이 되고 잠긴 쪽의 선형은 뒤틀리게 바뀌어, 유동의 박리현상이 나타나기 쉬운 모양이 되어 경계층의 발달이 예상된다(Lewis 1988). 예상과 같이 횡경사가 일어나면 선수트림이 일어났을 때 보다는 정도는 작으나 선미부에서 유속이 감소하는 것이 확인된다. 선수트림이 발생하면 선미부가 덜 잠기고 선수벌브에서의 박리현상 감소효과가 줄어들어(Lewis 1988), 선미부 유속이 큰 폭으로 감소하는 것으로 생각된다. 선미트림일 때는 선미부분의 침하가 선미형상을 더욱 뚜렷하게 만들어주는 효과가 있지만(Lewis 1988), 선미부가 깊이 잠길수록 유속의 증가의 영향이 더욱 크게 작용하여 결과적으로 유속이 증가하는 것으로 생각된다. 이는 프로펠러 면에서의 반류계측 결과와도 그 경향이 일치하고 있다. 또한 선미부 유속이 감소할수록 추력감소현상도 크게 나타나고 있는데, 이것은 선미부 유속이 느릴수록 추진기에 의한 선미부 유동이 가속되어 유속 및 유선의 변화에 크게 영향을 주기 때문인 것으로 생각된다.

추진기 단독효율(η_O)은 $J=0.5$ 이하에서는 유속이 느려질수록 전진비($J = V_A/nD$)가 낮아지고 단독효율도 낮아진다(양지만 2005).

Table 10 Comparison of self-propulsion coefficients (2D Extrapolation, $V_S = 15.5knots$)

Attitude		N_s (rps)	$1 - t$	$1 - w_M$	η_O	η_H	η_D
Heel	Trim						
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

4.8 반유계측결과

프로펠러 면에서의 유속계측결과는 Fig. 5에 나타내었다. 계측결과를 나타내기 위하여 프로펠러 축을 원점으로 하여 수선면에 평행한 직선을 X축, 원점인 프로펠러축을 지나는 연직선을 Y축으로 하는 좌표계를 사용하였다. X는 우현을, Y는 수직 상방을 양(+)의 값으로 나타내고, 계측위치는 프로펠러의 직경($D = 0.098m$)으로 무차원화 하였다.

Fig. 5의 계측결과를 살펴보면, Evenkeel인 경우 아주 뚜렷하진 않으나 프로펠러 보스 위쪽 부분에 저속비대선형의 특징적인 유동형태인 갈고리(Hook) 형태의 유동형상이 나타나고 있다. 그리고 계측결과와 3, 4사분면의 경우 통상적으로 저속비대선의 경우 선미부 아래쪽에서 박리되어 나온 유동이 유입되어, $0.7R$ 근처에서의 유속의 등고선이 조금 불룩하거나 가파른 형태가 될 것을 기대하였으나 계측결과에 잘 나타나지 않았다. 이는 축척비가 $1/100$ 인 모형선으로 Reynolds 수로 2.0×10^6 정도에 불과한 낮은 속도에서 실험하였기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

횡경사가 일어나면 프로펠러 면의 유동에 좌우 비대칭성이 나타난다. 깊이가 깊어진 우현 쪽을 살펴보면 프로펠러 보스 위쪽의 갈고리 모양의 유동형태가 많이 흐트러졌으며 발지 부분에서 유입된 보오텍스 유동의 흔적이 남아있다. 또한 우현의 프로펠러 보스 아랫부분의 유동에서는 선미 아

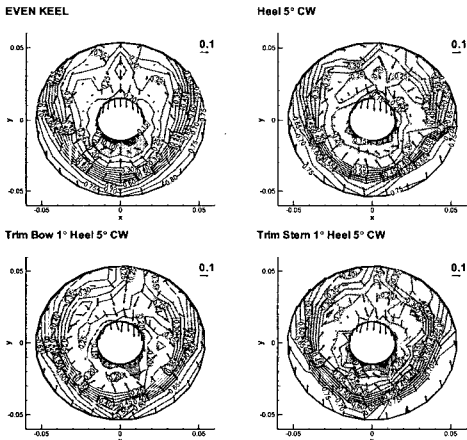


Fig. 5 Measured velocity contours at propeller plane ($V_S = 15.5knots$)

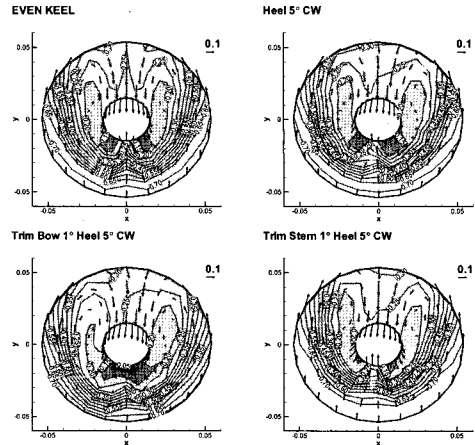


Fig. 6 Computed velocity contours at propeller plane ($Re = 2.02 \times 10^6$)

랫부분에서 박리된 유동이 유입되어 좌현에 비해 위로 불룩한 등고선이 나타남을 확인할 수 있다.

선수트림에 의해서는 선미부 경계층의 두께가 증가하여 유속이 느려지고 있으며, 프로펠러 보스 위쪽의 갈고리 모양이나 보오텍스 유동의 형태는 거의 사라지게 된다. 또한 프로펠러 보스 아래쪽 유동에서는 선미 아래쪽에서 유입되는 유동의 모습도 거의 나타나지 않고 있다.

선미트림일 때는 경계층의 두께가 감소하여 유속이 상대적으로 증가하고 있음이 확인된다. 프로펠러 보스 위쪽의 갈고리 모양이나 보오텍스 유동의 형태가 어느 정도 유지되고 있으며, 프로펠러 보스 아래쪽에 선미 아랫부분에서 유동이 유입되어 가파른 형태의 등고선을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 프로펠러 면에서의 유동의 수치계산결과이다. 실험결과와 마찬가지로 좌표계는 X는 우현을, Y는 수직 상방을 양(+)의 값으로 나타내었으며, 좌표계의 원점은 프로펠러축의 중심에 위치하며, 프로펠러의 직경으로 무차원화하였다.

계산결과에서는 실험결과와 같이, 횡경사에 의해 프로펠러 면에서 유동의 좌우 비대칭성이 나타나며, 선수트림에 의해 선미경계층의 두께가 증가하여 유속이 느려지는 것이 확인된다. 그리고 선미트림의 경우에는 경계층의 두께가 감소하여 유속이 상대적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

1970년대 이후 조선기술의 발전으로 선박이 자동화되고 각종 안전규정이 강화되었으나 세계적으로 해양사고 피해는 오히려 증가하고 있다. 최근에 이르러 사고선박을 처리하는데 따르는 유체역학적 성능 파악이 새로운 과제로 등장하고 있다. 본 논문에서는 대형 원유운반선의 선체 일부가 손상되어 침수로 횡경사와 트림이 발생되어 자세가 바뀐 가상 상태에서 선체주위의 유동현상과 저항 및 추진성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 저항성능 추정시험, 자항성능 추정시험 및 반류계측을 실시하는 한편 수치계산을 실시하였다.

선체에 횡경사와 트림이 발생한 비정상 상태에서 저항시험, 자항시험 및 선체반류계측을 실시하고 선박의 추진성능을 추정하였으며, 또, 선체에 횡경사 및 트림이 발생한 상태에서 비대칭조건을 고려한 수치계산을 수행하여 실험결과의 검토에 사용하였다. 이를 통하여 저속비대선의 초기 자세가 바뀌었을 때 항주 중 선체저항의 변화는 주로 형상저항의 변화에 기인함을 확인하였다. 이러한 사실은 이중모형 근사해법으로 점성영향을 고려한 수치해석 결과에서도 같은 결과로 나타나고 있다.

이는 해양사고로 손상된 저속비대선이 비정상적인 자세를 가지게 되었을 때, 자항 또는 예인하여 해양오염에 대처하는데 필요한 유체력을 실험적으로 확보하는 방안으로서 사용될 수 있으며, 또한 실험계측결과는 수치선박유체역학의 적용범위를 비대칭 침수상태의 선박에 대한 수치해석으로 적용범위를 넓히는데 필요한 기준자료가 될 것이다.

후 기

수치계산용 격자계 생성에 도움을 주신 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(KRISO)의 반석호 박사님, 김진 박사님, 박일룡 박사님께 감사를 드립니다. 또한 ASERC의 지원에도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김우전, 반석호, 김도현, 이춘주, 2000a, "선미선형을 변화시킨 두 척의 KRISO 300K VLCC 모

형주위의 유동과 저항추진 특성에 대한 실험적 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 3호, pp. 11-20.

- 김우전, 김도현, 반석호, 2000b, "선형평가를 위한 수치계산 시스템 WAVIS 개발," 선박해양 기술 제29호, 한국해양연구원, pp. 13-21.
- 박용철, 1992, "해난사고 방지를 위한 국제동향", 대한조선학회지, 제 29권, 제 2호, pp. 13-19.
- 박일룡, 김진, 반석호, 이춘주, 2003, "부가물 형상 변화에 따른 잠수함 주위 유동특성 해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 251-257.
- 양지만, 김효철, 2003, "경사상태에 있는 비대선의 저항추진 성능추정," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 216-221.
- 양지만, 김효철, 이신형, 2004, "자세변화가 비대선의 저항추진성능에 미치는 영향 해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 78-84.
- 양지만, 김효철, 2005, "대형유조선의 경사상태에서의 저항추진 성능추정," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 4호, pp. 307-314.
- 양지만, 2005, 자세변화가 비대선의 저항추진성능에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 서울대학교 공학박사학위논문.
- 한국해양연구소, 1999, 대형 고속 특수선 유체 성능 핵심기술 개발 (III) - 유체 성능 해석 시스템 개발 (II), 한국해양연구소 선박해양공학연구분소.
- Edward V. Lewis, 1988, Principles of Naval Architecture, Vol. 2, SNAME.
- Kim, S.E. and Rhee, S.H., 2002, "Assessment of Turbulence Models for a Three-Dimensional Boundary Layer Involving Crossflow and Streamwise Vortices," AIAA Paper 2000-0852, Proceedings of 40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV.
- Kim, W.J., Kim, D.H. and Van, S.H., 2002, "Computational Study on Turbulent Flows around Modern Tanker Hull Forms," Int'l Journal for Numerical Methods in Fluids Vol. 38, No. 4, Wiley, pp. 377-406.



< 양 지 만 >

< 이 신 형 >

< 김 효 철 >