

CFD를 이용한 유동제어 띠에 의한 저항감소 효과 조사

박동우* · † 윤현식 · 구본국**

*동명대학교 조선해양공학과 교수, † 부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터 교수, **창원대학교 조선해양공학과 교수

The Effects of Drag Reduction by Flow Control Grooves using CFD

Dong-Woo Park* · † Hyun-Sik Yoon · Bon-Guk Koo**

* Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea

† Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

** Department of Naval Architecture & Marine Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

요 약 : 최근 고유가와 환율변동 등 어려운 시장상황 속에서 해운선사는 선박의 대형화와 고속화를 요구하고 있다. 선사들은 선박의 운용 유지비 절감을 우선적으로 요구하고 있으며, 이에 조선소에서는 기술경쟁력 유지를 위한 방안으로 속도성능 향상에 중점을 두고 지속적으로 노력 하고 있다. 본 논문에서는 에너지 절약형 선형개발에 중점을 두고 유동제어 띠를 사용한 선박의 저항성능 향상에 관하여 소개한다. 본 연구는 혹등고래(Humpback Whale)의 배 주위에 있는 기다란 줄 무늬 형상을 응용하여 선체표면에 “오목하고 길게 팬 줄 형상 또는 블록하고 기다란 줄 형상”(이하, 유동제어 띠라고 함)을 단일로 적용하였다. 현재, 제안된 형상은 특허출원이 되어 있다. 이 형상은 선체표면의 압력 분포 변화와 압력강하 현상 등을 효과적으로 제어하는 역할을 한다. 실선 적용 시 장점은 블록조립이 완성된 후에 선체표면에 부가물을 부착 하는 종래기술과 비교하여 볼 때 블록제작 단계에서 단면형상을 반영할 수 있다는 점에서 비용을 절약할 수 있다고 판단된다.

핵심용어 : 길게 팬 줄 형상, 저항성능, 혹등고래, 압력분포

Abstract : Faced with global agenda of greenhouse abatement program including regulations and CO₂ emission trading scheme, shipping companies are enforced to a high level of efficiency in fuel consumption. Accordingly shipbuilding companies worldwide are required to develop fuel-efficient ships which otherwise traditionally consume a great amount of fossil fuels. In this dissertation, relevant to the improvement of fuel efficiency for commercial ships, design methodology through the numerical simulations are intensively described. This work consists of derivation of effective hydrodynamic design practice based on the application of longitudinal grooves to effectively improve the pressure distribution around ship hull. The primary objective of the present study is to improve ship resistance performance using longitudinal grooves which originate from long strips on the abdomen of humpback whale. Several groove shapes have been extensively investigated and the proposed shape efficiently controlled the variation of pressure distributions acting on the hull surface.

Key words : longitudinal grooves, resistance performance, humpback whale, pressure distribution

1. 서론

화석연료는 산업, 수송체 및 난방의 주요 에너지원으로 활용되면서 산업발전의 핵심역할을 주도 하였다. 그러나 이산화탄소 가스의 배출이 지속적으로 증가하여 온실효과를 야기하고, 이상 기후 현상에 의한 지구 오존층 파손, 북극 용빙 그리고 생태계 변화를 발생시키는 등의 역기능을 초래함으로써 지구의 환경 및 안전을 심각하게 위협하고 있다. G8 확대 정상회의에서는 ‘2050년 세계 전체의 온실가스 50% 감축’ 원칙을 정하기에 이르렀다. 이러한 온실가스 배출 제한 및 ‘탄소 배출권 거래제’의 확대에 따라 선박의 운항 효율에 대해 해운사를 비롯한 선주들의 관심이 급격히 높아지고 있으며, 대부분 화석

연료를 사용하는 선박을 건조하는 조선소들은 연료가 적게 소모되고 운항 효율이 높은 고 효율 선박 개발이 절실히 요구되고 있다. 아울러 2008년 말 발생한 금융위기로 인해 최근의 유가는 낮은 상태를 보이고 있지만 장기적으로는 고 유가 시대의 도래가 당연한 것으로 받아들여지고 있다. 이러한 배경에서 선박의 에너지 효율을 증대시키기 위한 관심과 노력이 집중되고 있는데 선형개발 및 추진기의 최적화와 더불어 연료절감장치도 에너지 효율을 향상시키는 유효한 방안이라 할 수 있다. 선박의 연비 개선 경쟁력을 높이기 위해서는 엔진성능을 향상시키는 방법도 있겠지만, 그 방법에는 한계가 있으며 결국은 에너지 절약형 부가물 적용 등의 선형 개발을 통해서 이루어질 수 있다. 선형 개발의 경쟁력을 높인다는 것은 속도를 더 내지 못하더라도 짐을 더 실을 수 있는 선형 혹은 똑같은

* 대표저자 : 연회원, dwpark@tu.ac.kr 051) 629-1654

† Corresponding author : 연회원, lesmodel@pusan.ac.kr 051) 510-3685

** 연회원, bonguk9@changwon.ac.kr, 055) 213-3686

은 무게의 짐을 선적해도 속도를 더 낼 수 있는 선형을 개발하는 것을 의미한다. 선박의 1회 편도 연료비를 간단히 계산해 보면, 13,000 TEU 급 대형 컨테이너 운반선의 경우, 1일 사용되는 벙커C유류의 소모량이 400톤 가량이며, 부산에서 LA까지 편도 운항일을 평균 7일로 가정하면, 편도 순수 연료비만 약 17억 정도(벙커C유류 톤 당 500\$ 기준)의 비용이 든다. 이 계산에 의하면, 선사가 주문한 선박의 설계속도가 계약속도 대비 0.1 노트 향상된다면 1회 편도 연료비가 1천 만원 정도 절감되며, 선박의 수명을 30년 이상으로 볼 때 연료비용만 계산하더라도 150억 이상의 절감을 가져올 수 있다. 선박의 연료 경제성을 높이기 위해서는 일반적으로 선체의 저항을 감소시키는 방법과 프로펠러 면의 유입속도를 개선하여 추진효율을 향상시키는 방법이 있다. Lim et al.(2007)은 컨테이너 운반선의 설계 과정에서 트랜섬 부근에 다양한 형태의 선미 부가물을 부착하여 수치해석 및 모형시험을 통해서 속도성능 향상에 관한 사례를 보여주었다. Lee et al.(2004)은 40,000 톤급 정유 운반선에 와류 생성기(Vortex Generator)를 부착하여 반류 분포를 변화시켜 속도성능을 개선시키는 방법을 제시하였다. Jang et al.(2006)은 CFD 기법을 활용하여 와류 생성기를 설계하고 모형시험을 통해서 실선에서의 속도 및 캐비테이션 성능을 확인하였다. 그 밖에 프로펠러 면에 유입되는 축방향 속도분포의 불균일성을 완화시키는 방안으로 와류 생성기를 부착시키는 방법이 많이 사용되고 있다(Baek et al.2002, Kim et al. 2004, Rhyu et al.2004, Hwangbo et al. 2004, Cho et al. 2007, Lee et al. 2008).

2. 수행내용

2.1 방법

본 논문에서는 유동제어 띠를 사용한 선박저항 감소기술을 소개한다. 본 연구는 혹등고래(humpback whale)의 배 주위에 있는 기다란 줄 무늬 형상을 응용하여 선체표면에 “오목하고 길게 팬 줄 형상 또는 볼록하고 기다란 줄 형상”(이하, 유동제어 띠라고 함)을 단일로 적용하였다. 현재, 제안된 형상은 특허출원이 되어 있다. 이 형상은 선체표면의 압력분포 변화와 압력강하 현상 등을 효과적으로 제어하는 역할을 한다.

2.2 형상정의

본 주제에 적용된 일반적인 형상은 Fig. 1~4에 나타내었다. 형상의 길이는 L로 정의하고, 높이는 H, 폭은 B, 홈이 파진 곡면반경은 R_r , 반경 끝단은 R_s 그리고 띠의 각도는 α 로 정의하였다. 단일 유동제어 띠로 저항감소가 어려울 경우, 그 효과를 극대화 하기 위해서 Fig. 4와 같이 복수의 조합된 형태를 적용한다. 복수의 형상을 적용할 경우 띠의 간격은 T로 정의하였다.

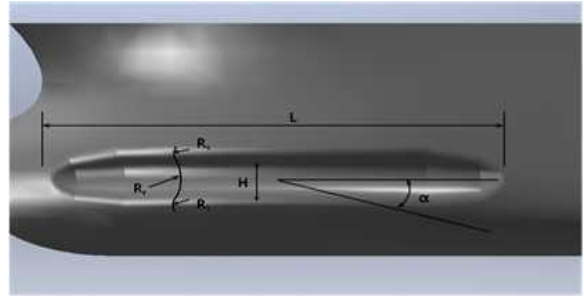


Fig. 1 Definition for the main dimension of the Hole



Fig. 2 Definition for the width of the Hole

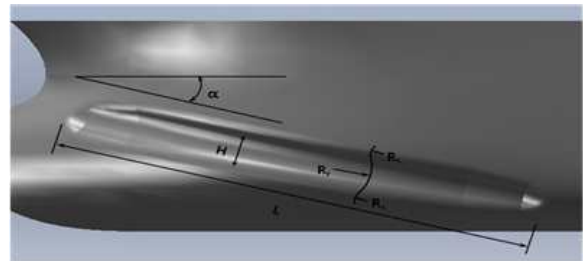


Fig. 3 Definition for the angle of the Hole

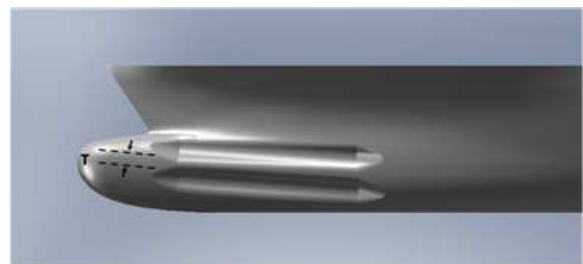


Fig. 4 Definition for the distance between Holes

3. 수치해석 방법

본 연구에서는 3차원 정상상태 비압축성 점성유동을 고려하였으며, 난류모델로는 저항 값 변화에 대한 신뢰성 있는 비교를 위해 Realizable $k-\epsilon$ 과 SST $k-\omega$ 두 가지를 사용하였다. 이에 대응하는 지배방정식으로는 아래의 연속방정식과 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)방정식들인, 식(1)과 식(2)가 각각 고려되어진다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i' u_j'}) \quad (2)$$

여기서 x_i , U_i , p , ρ 와 μ 는 직각좌표계, 속도성분들, 압력, 밀도와 점성을 각각 나타낸다. 또한, 식(2)의 레이놀즈 응력(Reynolds Stress)항인 $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ 은 표준 $k-\epsilon$ 모델에 의해 결정되어진다.

유한체적법에 근거한 범용 프로그램인 Fluent (2008)을 사용하여 위의 지배방정식을 계산하였다. 따라서 Fluent (2008)가 지원하는 SIMPLE법을 기반으로 대류항과 확산항에는 2차 상류차분법과 2차 중심차분법을 각각 적용하였다.

본 계산에서 고려되어진 좌표계, 계산영역 및 경계조건들은 Fig. 5에 도시되어져 있다. 대상선박은 저속비대선으로 조파저항이 전 저항에 차지하는 비율이 약 5% 내이며, 형상의 위치 또한 자유수면에 거의 영향을 주지 않는 곳에 적용되어 자유수면을 배제한 이중모형(double model)을 고려하였다.

Table. 1은 본 연구에서 고려한 선형인 KVLCC의 주요 제원을 보여준다.

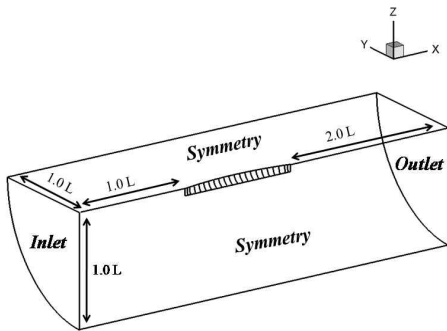


Fig. 5 A schematic diagram of the system

Table 1 Computational conditions for KVLCC

	KVLCC
$L_{PP}(m)$	5.5172
$B(m)$	1.0
$T(m)$	0.3586
$V_s(m/s)$	1.0469
R_N	4.6×10^6
$WSA(m^2)$	4.1285

수치해석 결과의 불확실성 해석을 위하여, 23차 ITTC에서 추천하는 방법(Wilson et al., 2001)에 따라 KVLCC 이중모형에 대해 Case1, Case2 및 Case3의 세 가지 격자계를 고려하여

$R_N = 4.6 \times 10^6$ 인 조건에서 총 저항값들을 비교하였다. 세 가지 격자계는 Table 2에 나타낸 바와 같이, 격자수는 일정한 비율 ($r_g = \Delta x_2 / \Delta x_1 = \Delta x_3 / \Delta x_2 = \sqrt{2}$)로 Case1에서 Case3로 갈수록 증가한다. 여기서, Y_{min} 은 선체표면과 첫번째 격자와의 평균 간격이고, Y_P^+ 는 Y_{min} 을 벽단위로 나타낸 값으로 벽법칙을 만족하는 대수영역에 있다. Wilson et al.(2001)이 제안한 이중모형에서 격자의존성 및 수치해석 방법의 검증법에 본 연구에서 고려한 세 가지 격자계에서 얻은 총 저항값들을 대입하였다. 그 결과 Validation uncertainty(U_V)는 2.1% 이며 시험과 수치계산의 차이인 E는 0.3 % 이다. $E < U_V$ 이므로 검증조건과 부합하는 결과를 보여주었다. 따라서 본 연구에서 고려한 세 가지 격자계 및 수치해석 방법은 타당하다고 판단된다. 이에, 계산의 시간 및 효율성을 고려하여 중간격자계인 Case 2를 본 연구의 계산에 도입하였다.

Table 2 Grid dependence test

	Case1	Case2	Case3	Exp.
Grid No.	453,500	1,405,850	4,125,137	-
Y_P^+	50	30	15	-
Y_{min}	0.0032	0.0025	0.0016	-
$C_T \times 10^3$	4.0662	3.9719	3.9352	3.9605

4. 결과 및 토의

대상선박은 KVLCC이며, 형상치수인 L, H, B 그리고 R_r 는 동일하게 하였다. 형상에 대한 제원은 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Particulars on the shapes applied KVLCC

Model		Hole		Hole/Model (%)
$L_{PP}(m)$	5.5172	L(m)	0.8	14.5
$B(m)$	1.0	B(m)	0.025	2.5
$H(m)$	0.3586	H(m)	0.082	23.0

형상의 각도는 0° , 5° , 10° 그리고 15° 네 가지로 하였다. 떠의 형상은 오목하고 중앙을 기준으로 앞과 뒤를 대칭으로 만들었다. Bare-Hull에 적용된 떠의 형상모습은 Fig. 6에서 Fig. 9에 나타내었다.

각도변화에 따른 유동해석 조건은 Table 4에 정리하였다. 격자 수는 140만개, Y_P^+ 는 30, 벽함수는 Non-equilibrium, 압력-속도 연성 항은 SIMPLE-C 그리고 이산화는 QUICK으로 고정하였다. 난류모델은 저항 값 변화에 대한 신뢰성 있는 비교를 위해 Realizable $k-\epsilon$ 과 SST $k-\omega$ 두 가지를 사용하였으며 그 결과를 모두 비교 하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 Bare-Hull에 대한 결과이다. Fig. 10은 선체표면에 작용하는 압력분포를 나타낸 것으로 선수 부위에

는 스테그네이션 점 근처인 관계로 압력이 높은 영역이 보이고 선체의 곡률을 따라 선수 벌브의 측면에 압력이 낮은 영역이 존재한다. Fig. 11은 한계유선을 나타낸 것으로 선수부에서 아래로 향하는 유선이 형성되어 형성되었다.

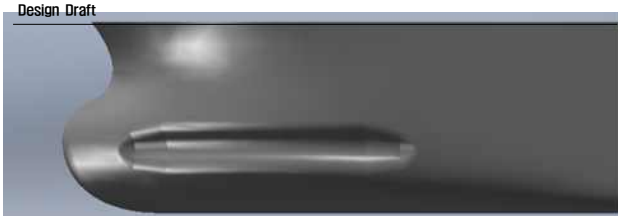


Fig. 6 Fore-body shape of KVLCC with Hole of 0°angle(CASE 1)

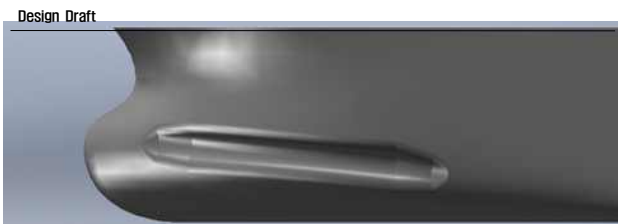


Fig. 7 Fore-body shape of KVLCC with Hole of 5°angle(CASE 2)

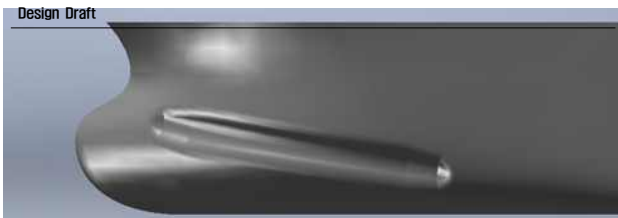


Fig. 8 Fore-body shape of KVLCC with Hole of 10°angle(CASE 3)

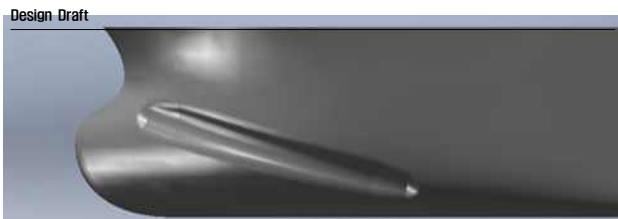


Fig. 9 Fore-body shape of KVLCC with Hole of 15°angle(CASE 4)

Fig. 12와 Fig. 13은 일정한 높이에 띠의 각도는 영(0)도로 적용한 결과이다. Fig. 12의 Zone I에서는 유동이 유입하여 오목한 홈으로 인해 유속이 가속되고, 이 영향으로 Zone II 영역에 압력이 낮아지는 현상을 보여주었다. Zone III와 Zone IV에서는 띠의 각도와 유입유동의 각도가 많은 차이로 인해 양의 압력범위가 넓어지는 부정적인 결과를 보이고 있다. Zone V에서는 평평한 홈이 갑자기 높아지는 턱으로 인해

유동이 느려져서 양의 압력이 발생하는 현상을 보였다. Fig. 13에서는 띠의 각도와 유동각도가 많은 차이를 보여 한계유선이 굴절되는 현상을 보여주었다.

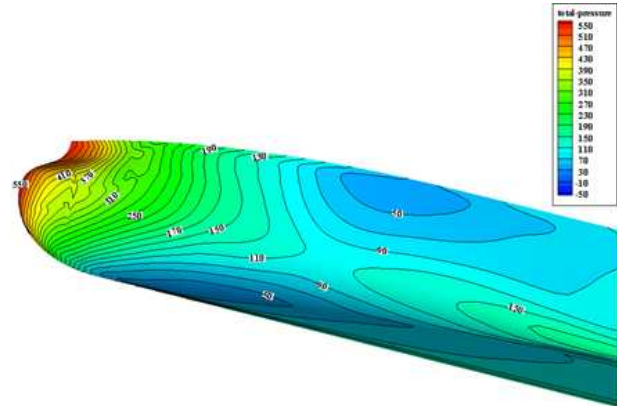


Fig. 10 Total Pressure Distribution for Original Hull of KVLCC

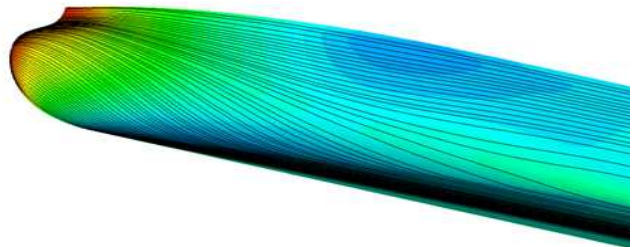


Fig. 11 Limiting Streamline for Original Hull of KVLCC

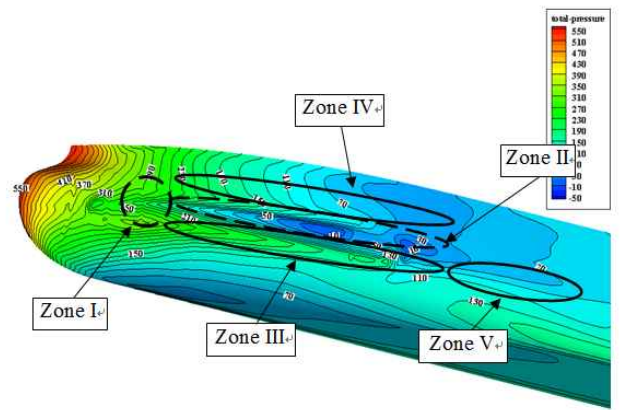


Fig. 12 Total Pressure Distribution for Case1 of KVLCC

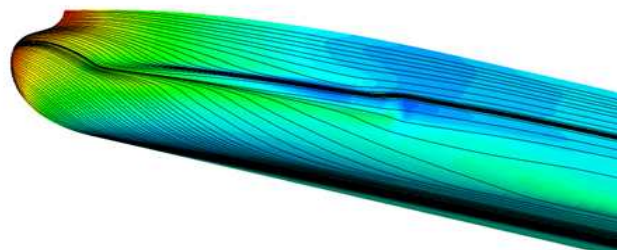


Fig. 13 Limiting Streamline for Case1 of KVLCC

Fig. 14와 Fig. 15는 일정한 높이에 떠의 각도는 5도로 적용한 것이다. Fig. 14의 Zone I에서는 미끄러지는 홈의 형상으로 인해 유속이 가속되고, 이 결과 Zone II 영역에 압력이 낮아지는 현상을 보여주었다. Zone III와 Zone IV에서는 0도로 부착된 것과 마찬가지로 양의 압력범위가 넓어지는 부정적인 결과를 보이고 있다. Zone V 역시 0도 부착된 것과 동일한 결과를 보이나 떠의 각도가 유선의 각도와 조금이나마 좁혀짐으로 인해 0도 보다는 좋은 결과를 보였다. Fig. 15의 한계유선 역시 0도로 부착된 것과 마찬가지로 굴절되는 현상을 보여주었다. 그리고 선미부에서의 Bare-Hull의 압력분포 그리고 한계유선을 유동제어 떠가 적용된 결과와 비교하였을 때 대동소이한 결과를 보여주었다. 즉, 유동제어 떠로 인한 유동의 변화는 선미부에 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

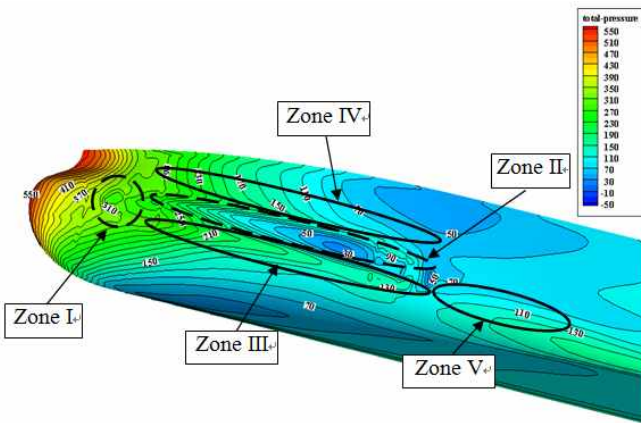


Fig. 14 Total Pressure Distribution for Case2 of KVLCC

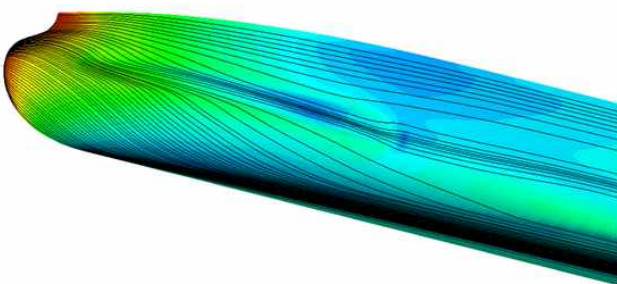


Fig. 15 Limiting Streamline for Case2 of KVLCC

Fig. 16과 Fig. 17은 일정한 높이에 떠의 각도는 10도로 적용한 것이다. Fig. 16의 Zone I에서는 유속이 가속되어 Zone II 영역에 압력이 낮아지는 현상을 보여주었다. Zone III와 Zone IV에서는 양의 압력범위가 넓어지는 부정적인 결과를 보이고 있다. Zone V에서는 턱으로 인해 양의 압력이 발생하여 유속이 늦어지는 현상을 보였다. Fig. 17의 한계유선은 0도와 5도로 부착된 것 보다는 한계유선의 굴절현상이 개선된 형태를 보였다. Fig. 18과 Fig. 19는 일정한 높이에 떠의 각도는 15도로 적용한 것이다. Fig. 18의 Zone I과 Zone II에서는 압력이 낮아져서 유체가 가속되는 현상을 보여주었다. Zone III와 Zone IV에서는 넓은 양의 압력범위가 존재하는 부정적인

결과를 보이고 있다. Zone V에서는 턱으로 인해 양의 압력이 발생하여 유속이 늦어지는 현상을 보였다. Fig. 19의 한계유선은 다른 각도로 부착된 것 보다는 한계유선의 굴절현상이 개선된 형태를 보였다.

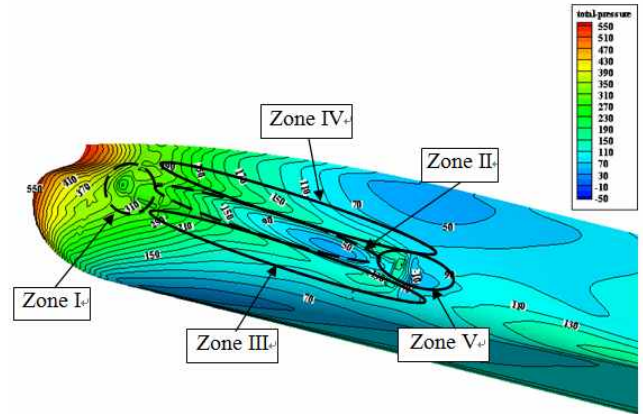


Fig. 16 Total Pressure Distribution for Case3 of KVLCC

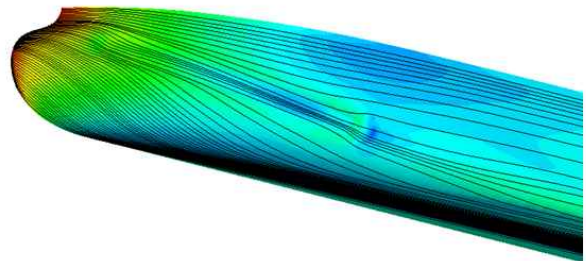


Fig. 17 Limiting Streamline for Case3 of KVLCC

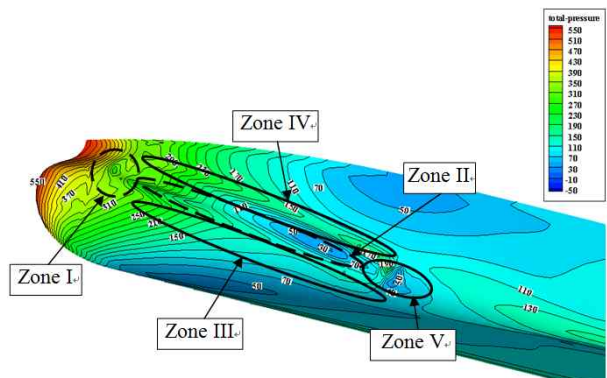


Fig. 18 Total Pressure Distribution for Case4 of KVLCC

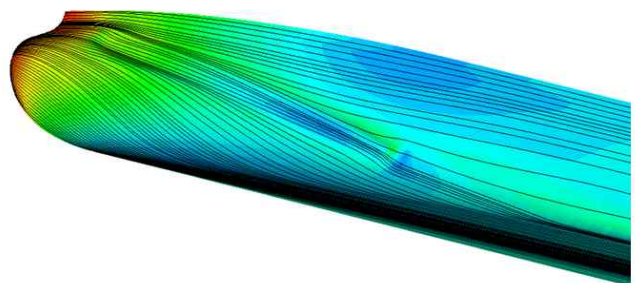


Fig. 19 Limiting Streamline for Case4 of KVLCC

Table 4 Calculation conditions for the various CASES (KVLCC)

Case	Angle (°)	Grid Number	Y_p^+	Model
Bare-Hull	-	1,405,850	30	Realizable k- ϵ
				k- ω SST
Case1	0	1,405,850	30	Realizable k- ϵ
				k- ω SST
Case2	5	1,405,850	30	Realizable k- ϵ
				k- ω SST
Case3	10	1,405,850	30	Realizable k- ϵ
				k- ω SST
Case4	15	1,405,850	30	Realizable k- ϵ
				k- ω SST

Table 5 Comparison of resistances by the various CASES (KVLCC)

Case	Angle (°)	Model	Force(N)			Coefficient $\times 10^3$		
			Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
Bare-Hull	-	Realizable k- ϵ	1.27927	7.70425	8.98353	0.56560	3.40627	3.97187
		k- ω SST	1.40949	7.64053	9.05002	0.62318	3.37809	4.00127
Case1	0	Realizable k- ϵ	1.32538	7.68929	9.01468	0.58530	3.39563	3.98093
		k- ω SST	1.48468	7.62428	9.10896	0.65564	3.36692	4.02256
Case2	5	Realizable k- ϵ	1.31067	7.69616	9.00683	0.57885	3.39894	3.97779
		k- ω SST	1.44279	7.62313	9.06592	0.63720	3.36669	4.00388
Case3	10	Realizable k- ϵ	1.32983	7.68669	9.01652	0.58749	3.39580	3.98328
		k- ω SST	1.45993	7.61137	9.07131	0.64496	3.36252	4.00749
Case4	15	Realizable k- ϵ	1.31832	7.68885	9.00717	0.58220	3.39560	3.97780
		k- ω SST	1.44756	7.61407	9.06163	0.63928	3.36257	4.00185

Table 6 Comparison of resistances for the various CASES by realizable k- ϵ model (KVLCC)

Case	Angle (°)	Force(N, %)			Coefficient $\times 10^3$ (%)		
		Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
Bare-Hull	-	100	100	100	100	100	100
Case1	0	103.60	99.806	100.347	103.48	99.688	100.228
Case2	5	102.45	99.895	100.259	102.34	99.785	100.149
Case3	10	103.95	99.772	100.367	103.87	99.693	100.287
Case4	15	103.05	99.800	100.263	102.93	99.687	100.149

Table 7 Comparison of resistances for the various CASES by k- ω SST model (KVLCC)

Bare-Hull	Angle (°)	Force(N, %)			Coefficient $\times 10^3$ (%)		
		Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
Bare-hul	-	100	100	100	100	100	100
Case1	0	105.33	99.787	100.651	105.21	99.669	100.532
Case2	5	102.36	99.772	100.176	102.25	99.663	100.065
Case3	10	103.58	99.618	100.235	103.49	99.539	100.155
Case4	15	102.70	99.654	100.128	102.58	99.541	100.014

저항분석 결과는 다음과 같다. Table 5에서 Table 7은 네 가지 각도변화에 의한 압력저항과 마찰저항의 결과를 비교한 것으로 이산화는 QUICK으로 고정하였다. 압력저항은 Case1에서 Case4까지 네 가지 모두 Bare-Hull 보다 증가하였고, 마찰저항은 모두 감소하였다. 전 저항은 네 가지 경우 모두 Bare-Hull 보다 증가하였다. 전 저항이 증가한 원인을 살펴보면 Fig. 12, 14, 16, 18의 Zone I과 Zone II는 마찰저항 감소 효과에 긍정적으로 작용하였으나, Zone III에서 Zone V는 형상으로 인해 압력저항 증가가 발생하였기 때문이다.

5. 결론

연구주제는 흑등고래의 배 주위에 생성된 여러 줄무늬의 형상으로부터 착안하였다. 적용된 줄 무늬를 유동제어 띠라고 하였으며, 이를 활용하여 선박의 저항감소 유무를 확인하였다. KVLCC에 대하여 흡의 형상은 일정하게 유지하고, 네 가지 각도에 따른 유동현상을 파악하였다.

정리하면 다음과 같다.

- 제안된 형상의 작용원리와 구조는 Zone I과 Zone II에서 밝혀진 대로 저항감소에 효과를 주는 것으로 판단된다. 단지, 형상으로 인해 발생하는 부정적인 부분, 즉 Zone III, IV, V를 저항감소 관점에서 어떻게 최소화하는가가 해결해야 할 과제이다.
- 형상의 각도는 타 부가물의 적용과 마찬가지로 유선의 굴절현상을 없애기 위하여 기존선형의 유선각도와 최대한 유사하게 적용되어야 한다는 결론을 얻었다.
- 형상에 의한 부분적 마찰저항 감소 효과는 확인하였다.
- 마찰저항 감소 부분은 최대한 유지하고, 압력저항 증가 부분은 형상변화 등을 통해 완화할 수 있는 형상 고안이 필요하다.
- 또한, 향후에는 형상의 길이, 높이, 폭 그리고 흡이 파진 곡면반경 변화에 따른 저항증감 분석이 필요하다고 판단된다.

References

- [1] Baek, C.S., Jin, C.B., Lee, J.K and Ryu, M.C., 2002, "A Study for the Improvement of Propeller Induced Vibration on an AFRAMAX Tanker," Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK, pp. 234-238.
- [2] Cho, Y.R., Lee, C.H., Jeong, S.G. and Choi, Y.D., 2007, "The Optimization of Vortex Generator for MR Class Ship," Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK, pp. 1151-1157.
- [3] "Fluent 6.3 user's guide", 2008, Fluent Inc.
- [4] Hwangbo, S.M., Han, J.M., Seo, J.S. and Lee, K.J., 2004, "Influence of Vortex Generators on the Ship's Hydrodynamic Performances - Cavitation Performances -," Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK, pp. 889-894.
- [5] Jang, Y.H., Park, J.J., Kim, B.G. and Choi, Y.B., 2006, "Notes on the Design and Application of Vortex Generators," Proceeding of the Annual Autumn Meeting, SNAK, pp. 467-472.
- [6] Kim, J.J., Rhyu, S.S., Kim, Y.S. and Jang, J.H., 2004, "Effect of Vortex Generator on Ship Hydrodynamic Performance - CFD Simulation-," Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK, pp. 901-906.
- [7] Lee, C.J., Park, I.R., Lee, Y.H. and Byeon, S.H., 2004, "A Study on the Performance Affected by Vortex Generator for DWT 40,000Ton Product Carrier," Proceeding of the Annual Autumn Meeting, SNAK, pp. 257-263.
- [8] Lim, C.S. and Park, D.W., 2007, "A Study on the Speed Effects of Afterbody Appendage for the Container Carrier," Special Issue of SNAK, pp. 32-42.
- [9] Lee, P.K., Jeong, Y.J., Byun, T.Y. and Park, N.J., 2008, "A Study on the Stern Flow affected by Vortex Generator for Low Speed Vessel," Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK, pp. 1193-1199.
- [10] Park, I.R., Kim, J. and Van, S.H., 2004, "Analysis of Resistance Performance of Modern Commercial Ship Hull using a Level-set Method" Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 2, pp. 79-89.
- [11] Rhyu, S.S., Kim, J.J., Choi, S.H., Jang, J.H. and Kim, S.E., 2004, "Effect of Vortex Generator on Ship Hydrodynamic Performance - Resistance and Propulsion Performance," Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK, pp. 895-900.
- [12] Wilson, R.V., Stern, F., Coleman, H. and Paterson, E., 2001, "Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations - Part 2: Application for RANS Simulation of a Cargo/Container Ship," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, pp. 803-810.

원고접수일 : 2014년 3월 12일

심사완료일 : 2014년 7월 2일

원고채택일 : 2014년 7월 7일