

## “Inclined Keel” 컨테이너선의 조파저항 최소화를 위한 선형최적화

서광철<sup>†</sup>\*, Mehmet Atlar\*, 김희정\*\*, 전호환\*\*

뉴캐슬대학교 School of Marine Sci. & Tech\*  
부산대학교 조선해양공학과\*\*

### Minimization of Wave-making Resistance for “Inclined Keel” Containership

Kwang-Cheol Seo<sup>†</sup>\*, Mehmet Atlar\*, Hee-Jung Kim\*\* and Ho-Hwan Chun\*\*

School of Marine Science and Technology, Newcastle Univ., UK\*  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National Univ.\*\*

#### Abstract

Ever increasing fuel prices, almost doubled in the last three years, and global pressure to reduce their environmental impact have been enforcing commercial vessel operators and designers to re-assess current vessel designs with emphasis on their propulsion systems and operational practices. In this paper the “Inclined Keel Hull (IKH)” concept, which facilitates to use larger propeller diameter in combination with lower shaft speed rates and hence better transport efficiency, is explored for a modern 3600 TEU container vessel with the aim of fitting an 13 % larger diameter propeller (and hence resulting 20% lower rpm) to gain further power saving over the similar size basis container ship with conventional “level keel” configuration. It appears that successful application of the “inclined keel Hull” concept is a fine balance amongst the maximum gain in propulsive efficiency, minimum increase in hull resistance and satisfaction of other naval architectural and operational requirements. In order to make the concept economically more viable, this paper concentrates on the fore body design with the possible combination of increase of volume in its fore body to recover the expected volume loss in the aft body due to the space for larger propeller and its low wave-making resistance to minimize the efficiency loss using a well-established optimization software.

※Keywords: Inclined keel(경사용골), IKH(Inclined Keel Hull, 경사용골선체), Container(컨테이너), Stern form(선미형상), Trim(트림), Hull form(선형), A large and slow turning propeller(대직경 저회전 프로펠러)

접수일: 2008년 5월 22일, 승인일: 2009년 2월 12일

†교신저자: Seo.kwang-cheol@ncl.ac.uk,

0044-(0)191-222-5863

## 1. 서 론

전세계 화물 물동량의 90% 이상이 대양을 통하여 이뤄지고 있으며, 최근에 발표된 세계은행(World Bank)의 보고에 따르면 향후 25년간 세계물동량이 3 배 이상 증가할 것으로 예상된다. 지금까지 해상 운송수단은 항공 및 육상 운송수단과 비교하여 친 환경적이라고 알려져왔다. 하지만 최근 UN(United Nation) 발표에 따르면, 지구온난화의 주범인 CO<sub>2</sub>의 배출량이 해상운송 수단의 경우가 항공운송 수단보다 실제 2 배에 달하는 것으로 알려졌으며 지구 환경에 상당한 영향을 주고 있다. 뿐만 아니라 국제적인 고유가로 인하여 최근 몇 년 간 선박연료가격이 큰 폭으로 상승하여 연료비용이 선박운항비용의 절반이상을 차지하기에 이르렀다. 이러한 비용의 증가로 인하여 선주들은 선박운항 비용절감을 위하여 연료효율 향상에 지대한 관심을 보이고 있다.

선박으로부터 나오는 온실배기 가스 량을 줄이는 한 방법은 선박연료 소비를 줄임으로써 가능하며 이는 선박의 경제적인 수익성을 유지시켜주기 때문에 이러한 효과적인 연료절감 방법에 많은 사람들이 관심을 기울이고 있다. 연료절감을 위해서는 선박 유체역학적 관점에서 기본적으로 최대추진효율을 갖는 추진기와 최소저항을 갖는 선형의 조화가 잘 이뤄져야 한다. 하나의 프로펠러를 가진 단추진기(Conventional propellers)를 고려하였을때 프로펠러효율을 결정하는 가장 중요한 요소는 프로펠러의 직경(Diameter)과 이에 상응하는 피치와 회전수이다. 기본적인 프로펠러 유체 이론(Rankine 1865)이나 Bp-delta 프로펠러 설계 차트(Van Lammeren et al. 1969)를 이용하여 대직경 저회전 프로펠러의 높은 추진 효율을 증명하는 것은 진부한 일일 것이다. 이러한 대직경 저회전 프로펠러를 활용한 연료 절감 효과를 연구한 다양한 논문들이 발표되었다(Choi et al. 2004, Ciping et al. 1989, Kim et al. 2004,).

일반선형에 추진향상을 위한 대직경 프로펠러

적용 시 선미형상 개발에 많은 어려움이 따른다. 특히 선체진동을 고려한 프로펠러와 선체와의 충분한 간극(Hull clearance)과 선박의 안정적인 운항을 위하여 프로펠러가 수면근처에서 운행하는 것을 방지하기 충분한 프로펠러 잠김깊이 등이 요구된다.

본 연구에서는 대직경 저회전 프로펠러를 대형상선에 적용하기 위해 경사용골(Inclined Keel) 개념을 도입하여 추진성능 향상을 도모하고자 한다. 경사용골 개념은 대직경 프로펠러의 충분한 잠김 깊이와 선체 간극 확보를 위하여 선미 흘수가 일반선형보다 깊고 선수 흘수는 일반 흘수 보다 낮은 형상을 나타낸다. 이는 수면 아래의 형상을 비교하면 일반선형의 선미트림 형상과 비슷하다. 비록 경사용골 개념은 어느 선형에든 적용가능하나, 일반 선형보다 선미흘수가 깊기 때문에 수심이 얇은 항구나 천수 지역을 자유롭게 운행하기 위해 발라스트를 이용한 흘수변경을 할 수 있도록 화물 적재상태에서도 내부에 충분한 발라스트와 발라스트 탱크를 확보하고 있는 선형에 적합할 듯 하다. 선박의 운항상 또는 안정성 등의 문제 때문에 프로펠러의 직경을 키우기 어려운 컨테이너 선에 경사용골 설계개념을 적용하여 대직경 저회전 프로펠러를 통한 에너지 절감 효과를 이루고자 한다.

경사용골 개념, 기준선형의 선택, 프로펠러 직경이 기준선형보다 약11% 큰 경사용골 선형 개발 및 두 선형의 비교를 위한 기본적인 유체역학적인 특성(선체저항, 추진성능, 케비테이션, 압력변동)의 수치해석 등은 최근 여러 차례 발표된 바 있다(Seo et al. 2006, Seo et al. 2007a, Seo et al. 2007b). 경사용골개념 도입의 성공적인 열쇠는 대직경 프로펠러 도입으로 예상되는 추진효율이익이 선체저항의 증가로 인하여 효율이 상쇄되지 않도록 최적 선형을 개발하는 것이다. 본 논문에서 다루고 있는 내용은 경사용골 선형개발을 요약하며, 대직경 프로펠러 공간확보를 위해 생긴 선미 용적(volume)손실을 선수부분에 확보하고 이

경사용골 선형의 선수가 낮은 조파저항(wave-making resistance) 성분을 갖도록 설계하는 것이다. 이러한 최적선형 개발을 위해서 부산대학교에서 개발한 선형최적화 프로그램인 RaPID-HOP(Kim et al. 2007)을 사용하여 조파저항 관점에서 선형최적화 작업을 수행하였으며 본 논문에서는 위의 내용 및 결과를 포함한다.

**2. 기준선형의 선택 및 경사용골 선형 개발**

**2.1 경사용골 개념**

경사용골 선박은 선박의 선미형상을 직경이 큰 프로펠러를 설치하기 위해 설계된 선형이다. 대양의 운항상태에서는 프로펠러의 충분한 잠김 깊이와 안정성을 위해 선미흘수가 선수흘수 보다 큰 상태가 되며 이는 자연스럽게 1도 미만의 작은 경사용골 각도를 나타낸다(Seo et al. 2007a, Seo et al. 2007b).

**2.2 기준선형 선택**

본 연구에서는 선형최적화와 모형실험을 통해 검증된 3600TEU 파나막스급 컨테이너 선을 기준선형으로 선택하였으며 정면도(Body Plan)와 선형의 주요치수를 Fig. 1 와 Table 1 에 나타내었다.

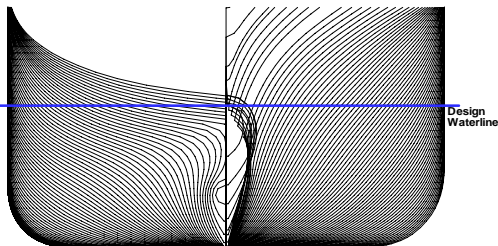


Fig. 1 Body plan of the Basis Hull (BH)

Table 1 Main particulars of Basis Hull

Length (pp) (m)	232.80
Breadth (m)	32.20
Draught (m)	11.30
$C_B$	0.599
Propeller Diameter (m)	7.91

**2.3 경사용골 선형 개발**

대직경 프로펠러로부터 얻을 추진성능향상을 위하여 프로펠러 크기가 7.9m 에서 8.9m 약 12.6% 크게하였다. 선박저항에 큰 변화가 없을 시 프로펠러직경의 12% 증가는 약 5-6%의 추진효율을 주는 것으로 알려졌다(Yamano and Iwasaki 1994). 8.9m 프로펠러를 기준선형의 프로펠러 공간에 설치하기 위하여 Table 2 에 나와있는 주요치수를 기준으로 경사용골 선형을 개발하였다. 경사용골 선형은 계획흘수 운항시 프로펠러가 물밖으로 나오는 확률을 줄이기위하여 기준선형과 비슷한 프로펠러 잠김 깊이 확보를 위해 1.6m 선미트림으로 운항하도록 설계되었다. 계획흘수시의 프로펠러 축 잠김깊이는 Table 3 에 나와있으며 Fig. 2 에 도식하였다. 여러 흘수에서의 운항조건은 Table 4 에 나와있으며 흘수가 깊을수록 선미트림 양을 줄이며 평균흘수 12.1m 이상에서는 다른 선형과 똑같이 등트림(Even trim)으로 운행한다. Fig. 3 과 Fig. 4 는 경사용골 개념을 적용하여 설계한

Table 2 Comparison of geometric particulars near propeller shafts of Basis Hull and Inclined Keel Hull

Hull Type	BH	IKH
Distance from baseline to propeller lower tip (m)	0.075	0.10
Propeller Diameter (m)	7.91	8.9
Distance from propeller upper tip to hull (m)	2.22 (28%D)	2.41 (27%D)
Distance from baseline to hull at propeller plane (m)	10.20	11.41

Table 3 Propeller shaft immersion at design draught

Hull Type	Basis Hull	Inclined Keel Hull	
Operating Condition (Calm water)	Level trim	Level trim	1.6m trim by the stern
		lo	7.55
Design draught	R	4.45	4.45
	lo/R	1.70	1.70
	lo	7.25	6.75

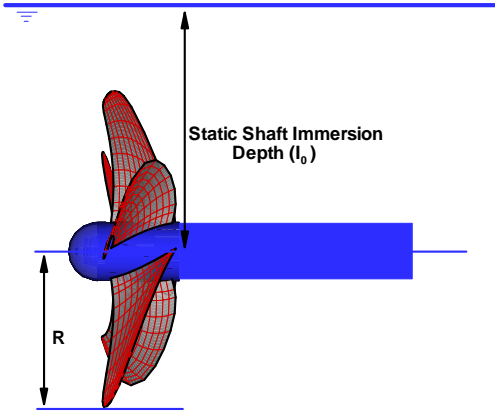


Fig. 2 Static propeller shaft immersion

Table 4 Draughts at different operational conditions

Hull Type		Basis Hull	Inclined Keel Hull	
Operating Condition		Normal	Harbour	Deep Sea
Design Draught	T <sub>F</sub> (m)	11.3	11.3	10.5
	T <sub>A</sub> (m)	11.3	11.3	12.1
	T <sub>F</sub> (m)	11.7	11.7	11.3
	T <sub>A</sub> (m)	11.7	11.7	12.1
	T <sub>F</sub> (m)	12.1	12.1	12.1
	T <sub>A</sub> (m)	12.1	12.1	12.1
Scantling Draught	T <sub>F</sub> (m)	12.5	12.5	12.5
	T <sub>A</sub> (m)	12.5	12.5	12.5

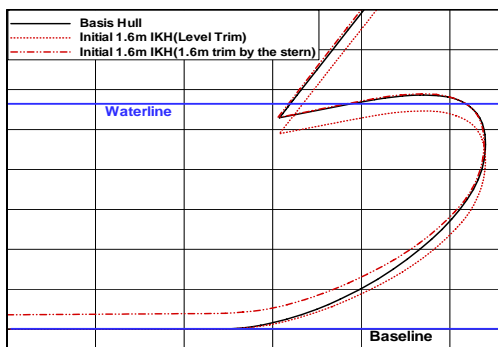


Fig. 3 Bow profile modification for a larger propeller

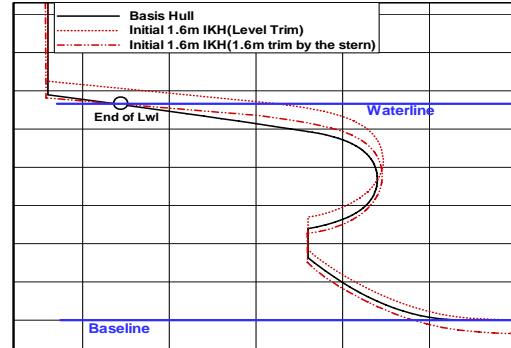


Fig. 4 Stern profile modification for a larger propeller

선수미 측면도(profile)를 기준선형과 비교 하였다.

경사용골은 대직경프로펠러의 충분한 잠김 깊이를 위하여 대양에서 1.6m 선미트림으로 운영을 할 것이며 선수벌브는 트림양을 고려하여 선수벌브가 물밖으로 많이 나오는 것을 막기위하여 기준 선형보다 작게 설계되었다.

설계된 경사용골선형과 기준선형의 정면도를 Fig. 5 에 비교하였으며, 설계흘수에서의 유체정역학적 수치는 Table 5 에 나타내었다. 프로펠러 공간 확보를 위한 선미공간 손실을 만회하기 위해 선수부에 용적을 증가시켰다. 이로 인하여 저항에 비례하는 침수표면적이 많이 감소하였다. 하지만 경사용골 선박은 등흘수 상태에서 기준선형보다 볼륨이 350 m<sup>3</sup> 부족하여 컨테이너 적재 갯수의 감소가 예상되는 바 선형최적화과정에서 이를 확보하는 방향으로 전개가 되어야 할 것이다.

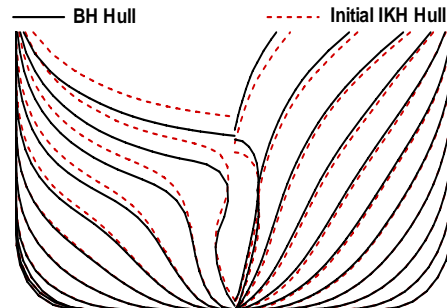


Fig. 5 Comparison of body plan at level trim

**Table 5** Comparison of main hydrostatic particulars of Basis Hull and developed Inclined Keel hull

Main Dimension	Basis Hull	Inclined Keel Hull	
		(even)	(trim)
Length (pp) (m)	232.8	232.8	232.8
Breadth (m)	32.2	32.2	32.2
Draught $T_{aft}$ (m)	11.3	11.3	12.1
Draught $T_{fwd}$ (m)	11.3	11.3	10.5
Displacement( $m^3$ )	50886	50534	50877
WSA( $m^2$ )	9333	9181	9252
Propeller dia. (m)	7.91	8.9	
Tip clearance (%)	28%D	27%D	
Inclined keel angle	0.00	0.00	0.40-0.45

### 3. 조파저항 관점에서의 선형최적화 및 저항분석

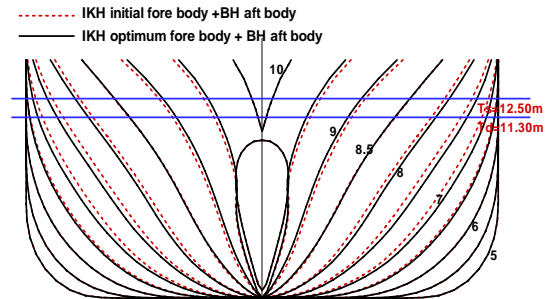
#### 3.1 조파저항 관점에서의 선형최적화

증가된 프로펠러 직경으로부터 효과적인 추진 효율을 얻기 위해서는 경사용골의 저항 증가분을 최소화하여야 한다. 그럴지 않으면 기대되는 프로펠러 효율로부터 얻어지는 이득이 저항의 증가로 인하여 크게 감소하기 때문이다. 이를 위하여 부산대학교에서 개발한 선형최적화 프로그램인 RaPID-HOP 을 사용하였다. 또한 개발된 최적선형은 유체해석 프로그램 SHIPFLOW 를 통하여 재확인되었다.

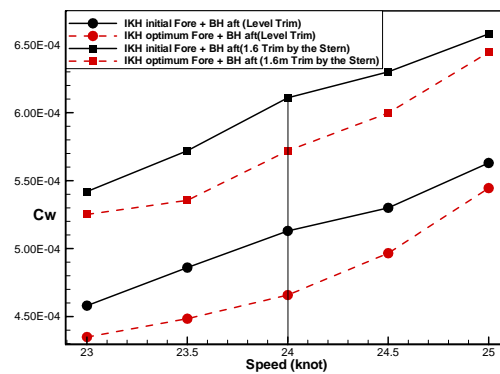
선형최적화는 다음과 같은 제약조건하에서 수행되었다. 선수부 측면형상(stem profile)은 고정되었으며 선형 중앙부에서 선수벌브 끝단까지 변형이 허용되며 선수부에서 볼륨은  $300 m^3$  증가가능하도록 설정하였다.

기준선형의 선수부와 경사용골선형의 선수부가 조파저항에 미치는 영향을 직접비교하기 위하여 기준선형의 선미부를 경사용골에 사용하였다.

최적화 과정을 통하여 도출된 최적선형과 초기 경사선형의 선수부 정면도를 Fig. 6 에 나타내었다. 8.5 스테이션(station)을 중심으로 선형이 크게 변화하였음을 알 수 있다. Fig. 7 은 설계 속도(24knot)



**Fig. 6** Comparison of body plan at level trim



**Fig. 7** Numerical results for favourite design with forebody optimisation

주변에서의 조파저항계수를 나타내고 있다. 트림 상태에서는 등트림 보다는 최적화 효과가 조금 줄어들었지만 볼륨이  $300 m^3$  늘어났음에도 불구하고 전체적으로 5-10%의 조파저항 감소효과를 보여주고 있다.

기준선형의 선수부와 경사용골 최적선형의 선수부 정면도 비교를 Fig. 8 에 나타내었다. 선수벌브 크기와 선수부가 많이 바뀌었음을 알 수 있다. Fig. 9 는 횡단면적(Sectional area curve)을 나타내며 선수부에 단면적이 크게 증가하였음을 알 수 있다. 이러한 단면적이 증가하였음에도 불구하고 조파저항 역시 기준선형보다 약 7%정도 감소되었으며 Table 6 에 관련 계수들을 나타내었다.

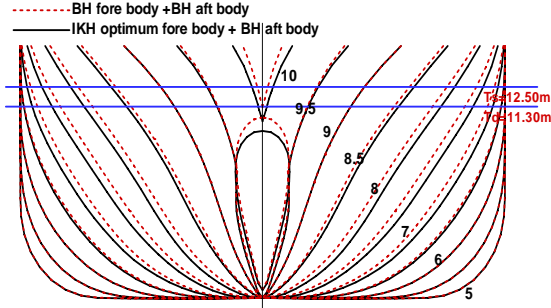


Fig. 8 Comparison of body plan at level trim

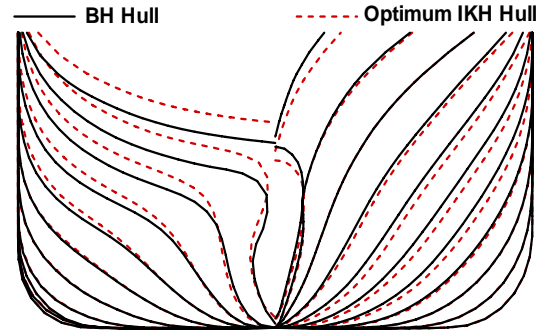


Fig. 10 Comparison of body plan at level trim

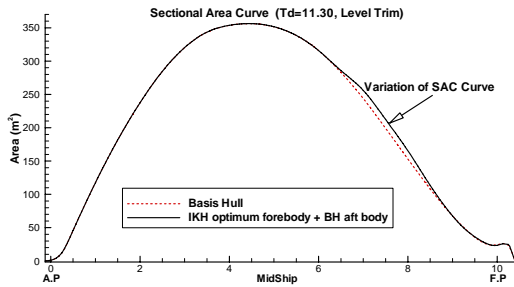


Fig. 9 Comparison of sectional area curve

Table 7 Comparison of main hydrostatic particulars of Basis Hull and optimized Inclined Keel Hull

Main Dimension	Basis Hull	Inclined Keel Hull	
		(even)	(trim)
Length (pp) (m)	232.8	232.8	232.8
Breadth (m)	32.2	32.2	32.2
Draught $T_{aft}$ (m)	11.3	11.3	12.1
Draught $T_{fwd}$ (m)	11.3	11.3	10.5
Displacement( $m^3$ )	50886	50830	51200
WSA( $m^2$ )	9333	9210	9270
Propeller dia. (m)	7.91	8.9	
Tip clearance (%)	28%D	27%D	
Inclined keel angle	0.00	0.00	0.40-0.45

Table 6 Wave-making resistance for two hulls

			Forebody + BH aft		Diff (%)
			BH	IKH Opti	
Design	$T_f$	11.3	5.004	4.657	-
Draught	$T_a$	11.3	E-04	E-04	6.9

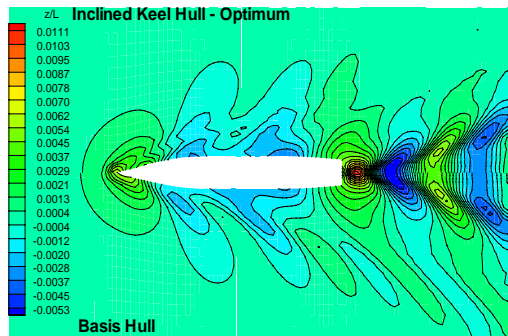
3.2 유체정역학 및 선박저항 분석

위의 도출된 경사용골의 최적 선수부는 대직경 프로펠러 공간확보를 위해 불가피한 용적 감소와 수선 단면적(waterplane area) 감소를 만회하기 위하여 많은 용적과 수선면 폭이 크게 넓혀졌다. 이는 Fig. 10에 나와있는 경사선형과 기준선형의 정면도를 통해 확인할 수 있다. 두 선형의 유체정역학 데이터는 Table 7에 비교하였다. 용적은 등트림 상태에서 기준선형에 가까운 값을 보여주고 있으며 저항값과 관련있는 침수표면적은 크게 줄어들었다.

선형의 저항계수 비교를 위하여 상용프로그램인 SHIPFLOW를 사용하였다. 선형의 형상계수(Form factor)는 SHIPFLOW의 XCHAP를 이용하여 계산을 수행하였으며  $Fn=0.252$ , 그리고,  $Rn=1.76E+07$ 의 조건에서 수행하였다. 두선형에 대한 수치계산 결과는 아래의 Table 8에 나타내었다. 경사용골 선형의 조파저항계수는 기준선형에 비하여 11% 감소하였지만 형상저항은 약 1.5%증가하였다. 침수표면적이 기준선형보다 0.7%감소였으며 전 저항은 조파저항과 침수표면적 감소로 인하여 약 2%향상되었다. Fig. 11은 기

**Table 8** Comparison of the resistance characteristics at design draft (11.30m)

	Computation		
	Basis Hull	IKH (2.4m Trim)	Diff.(%)
Cw	5.00E-04	4.45E-04	-11.00
1+k	1.197	1.215	1.50
Cf	1.367E-03		0.00
(1+k)Cf+Cw	2.14E-03	2.10E-03	-1.42
Wetted area	9333	9270	-0.68
Rw (kN)	364	322	-11.6
Rt (kN)	1557	1525	-2.10



**Fig. 11** Comparison of wave contours from potential flow analysis, Bottom =BH; Top = IKH.

준선형과 경사용골선형의 포텐셜 해석 자유수면 파형을 나타낸다. 선미부분에서 파가 기준선형에 비하여 작게 생성됨을 알 수 있다. 하지만 선미파는 점성의 영향이 크기 때문에 좀 더 구체적인 연구가 필요하다.

#### 4. 결론 및 고찰

대직경 저회전 프로펠러를 통한 연료절감 효과를 얻기 위한 설계 방법으로 여선이나 예인선에 주로 사용되고 있는 경사선형 방법을 대형 상선에 도입하였다. 본 논문에서는 선형최적화와 모형실험을 통하여 검증된 3600TEU 컨테이너 선을 기준선형으로 사용하였다. 경사선형의 프로펠러 직경은 기준선형의 7.91m 에서 약 12.6%증가한

8.9m 를 적용하였다. 성공적인 경사용골 선형은 대직경으로부터 얻어지는 추진효율 이득이 선체저항의 증가로 인하여 상쇄되지 않도록 설계하는 것이다. 이를 위해 조파저항 관점의 선형최적화 작업을 수행하였으며 다음과 같은 내용을 도출하였다.

- 1) 대직경 프로펠러 공간확보를 위한 선미부의 용적손실은 선수부에서 적절히 확보되어야 한다.
- 2) 개발된 경사용골 선수부는 상당한 용적증가에도 불구하고 조파저항 감소효과를 볼 수 있다.
- 3) 조파저항 관점의 선형 최적화 과정을 통해 도출된 용골선형은 줄어든 침수표면적 및 조파저항 성능의 향상이 선체저항 감소에 기여할 것으로 예상된다.

대직경 저회전 프로펠러와 저항관점에서 잘 설계된 선형의 전체적인 추진 효율의 향상 검증을 위해서는 개발된 선형에 대한 전반적인 저항/자항 모형실험이 요구된다.

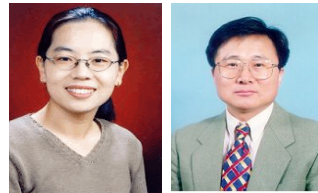
#### 참 고 문 헌

- Choi, Y.B., Hwang, S.Y., Jang, H.Y. and Kim, K.B., 2004, " A Study on the Selection of Parameters for the Optimum Propeller," Proceeding of the Annual Autumn meeting in The Society of Naval Architects of Korea., pp. 556-564.
- Ciping, J., Lianguan, C. and Weiming, T., 1989, "Investigation on Resistance and Propulsive Qualities of Large Full Ship with Low Revolution Large Diameter Propeller," International Symposium On Ship Resistance and Powering Performance, pp. 184-190.
- Kim, H.J., Choi, H.J. and Chun, H.H, 2007, " Practical Hull Form Optimization Method Using the Parametric Modification Function," Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 44, No. 5, pp. 542-550.
- Kim, H.Y., Kim, M.C. and Chun, H.H., 2004,

- “ Comparison of Waterjet Performance for Tracked Vehicle according to the Variation of Impeller Diameter,” Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 41, No. 5, pp. 22–27.
- Rankine, W.J.M., 1865, "On the Mechanical Principles of the Action of Propellers," Trans.R.I.N.A , pp. 13–39.
  - Seo, K.C., Atlar, M. and Mesbahi, E., 2006, "Inclined Keel could provide propulison benefits," No.123, Fairplay Solutions, pp. 37–38.
  - Seo, K.C., Atlar, M., Kim, H.J., Chun, H.H. and Kang, D.S., 2007a, “ Efficient Propulsion of a Container Ship using the ‘ Inclined Keel’ Concept,” Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 44, No. 4, pp. 379–388.
  - Seo, K.C., Atlar, M., Kim, H.J., Chun, H.H, Kang, D.S. and Lee, I.W., 2007b, “ Hydrodynamic Development of an Efficient ‘ Inclined Keel’ Container Vessel,” Proceeding of the Annual Autumn meeting in The Society of Naval Architects of Korea.
  - Van Lammeren, W., Van Manen, J. and Ossterverld, M., 1969, "The Wagenigen B-Screw Series," Trans. SNAME, pp. 269–317.
  - Yamano, T. and Iwasaki, Y., 1994, “ Development of a New Stern Form for Ocean Going Fine Ships,” Journal of Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 221, pp. 25–33.



< 서 광 철 > < Mehmet Atlar >



< 김 희 정 > < 전 호 환 >