CFD를 이용한 벌크화물선의 선형개발

박현석*, 김병남**, 김우전^{†**}

대한조선주식회사*
목포대학교 공과대학 선박해양시스템전공**

Hull Form Development of a Bulk Carrier using CFD

Hyun-Suk Park*, Byeoung-Nam Kim** and Wu-Joan Kim^{†**}

Daehan Shipbuilding Co., Ltd.*
Dept. of Naval Architecture & Marine Eng., Mokpo National University**

Abstract

CFD tools were intensively used to develop a bulk carrier hull form of 180,000 DWT. HCAD and WAVIS were utilized to vary and evaluate the hull forms. LCB and framelines were systematically changed starting from a mothership. Resistance characteristics have been assessed by evaluating the wave-pattern resistance and viscous pressure drag along with the wave profile and wake distribution. It was found that the hull forms obtained from LCB variations were not good enough to satisfy the target resistance coefficient because of large wave generation at the design speed. After choosing the appropriate one from the LCB variation series, bow and stern framelines have been modified to improve wave-making characteristics and wake distribution, respectively. Model tests were performed to confirm the CFD results. Furthermore, the effect of free surface on CFD application was investigated, and a few comments are given on the difference between WAVIS version 1.4 and 2.0.

※Keywords: CFD(계산유체역학), Hull form(선형), LCB(길이방향의 부력중심), Frame line(늑골선)

1. 서 언

조선소의 설계 과정에서 개발된 선형의 성능평가를 위해 흔히 예인수조 모형시험이 수행된다. 하지만 여러 선형에 대한 모형시험을 수행하여 최종 선형을 결정하는 것은 비용과 시간의 제약 때

접수일: 2008년 5월 14일, 승인일: 2008년 9월 28일

†교신저자: kimwujoan@mokpo.ac.kr, 061-450-2766

문에 어려운 게 현실이다. 최근에 개발된 수치계산 기법을 이용하는 경우, 상대적으로 저렴한 비용으로 선형에 대한 성능평가를 수행할 수 있기 때문에 현재 조선소의 선형개발단계에서 CFD 기법이 활발히 사용되고 있다. 하지만 선형변환과 연계된 수치계산 결과의 해석 및 정확도에 대한 평가와 활용방법 등에는 아직도 많은 연구가 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 최근 수주가 활발한 180,000 DWT 벌크화물선의 선형을 선형변환 프로그램인 HCAD(Lee 2000)와 저항성능 추정 CFD 프로그램인 WAVIS(Kim et al. 2000a, 2000b, 2000c)를 활용하여 단면적 곡선, 배수량 중심, 늑골선 형상 등 주요 설계요소를 체계적으로 변화시키고, 선형변화에 따른 저항특성을 비교 검토함으로써 저항추진 성능이 우수한 선형을 개발한 과정을 기술하고자 한다. 그리고 자유수면을 포함한 점성유동계산 결과를 바탕으로 WAVIS 프로그램의 각 버전별 특징과 차이를 살펴보았다.

2. CFD를 활용한 선형 개발

2.1 설계변수의 제약

본 연구에서 개발한 벌크화물선의 선종은 프랑스 북부의 뒹케르크 항을 경유하는 선박으로서 항구 여건 및 계약조건에 따른 주요 치수에 대한 제약조건이 있었다. 또한 공동연구를 수행했던 조선소의 설계계획에 따라 최초 모선인 170,500 DWT 급¹⁾ 선형의 엔진, 프로펠러 직경, 주요목 등을 180,000 DWT 급²⁾ 개발선에도 그대로 적용하기로 결정했다.

2.2 선형변환과 CFD를 이용한 수치계산

2.2.1 선형변환

본 연구에서는 먼저 설계개념 정립을 위한 초기 단계에서 이미 개발이 완료되어 모형시험을 수행한 바 있는 170,500 DWT급 선형을 모선으로 결정하였다. 그리고 모선으로부터 배수량과 선박 길

이를 증가시키며 위의 설계 제약조건을 만족하도록 모선의 중앙평행부를 일정한 길이만큼을 증가시켜줌으로써 180,000 DWT급 개발선의 기준선을 생성하였다. 하지만 주요 제약조건들 중 하나인 배 길이의 제한 때문에 평행중앙부 길이 증가만으로는 배수량이 약 2,000톤가량 부족하였다. 부족한 배수량을 채우면서 그에 따라 변화된 LCB 위치에서의 선체주위 유동 특성을 검토하기 위해서 180,000 DWT 기준선에서 선수미 늑골선 형상을 유사하게 갖도록 하고 선수, 선미에 각각 독립적으로 배수량을 증가시켰다. 그러나 변화된 LCB의 위치에 따른 유동현상을 검토해본 결과, 최초 모선인 170,500 DWT 늑골선 형상으로는 목표했던 새로운 선형의 저항계수를 만족시킬 수 없었다. 하지만 일반배치 및 화물창 공간 확보의 용이성, 트림조건 등을 고려하여 LCB 3.35%인 선형을 1차 모형시험 대상선형으로 결정했다. 이는 비록 목표했던 저항계수들을 만족시키지 못했지만 CFD에 의한 수치 계산이 모형시험 결과를 어느 정도 재현가능한지를 먼저 검토하고, 그 결과를 바탕으로 최종 선형을 결정하기 위함이었다.

1차 모형시험 결과와 WAVIS를 이용한 수치계산 결과로 얻은 조파특성 및 형상저항 그리고 공칭반류(nominal wake)의 수치가 모형시험 값들과 비교적 잘 일치하였으며, CFD 결과가 정성적인 경향뿐만 아니라 정량적인 수치의 추정에도 사용이 가능함을 확인하는 성과를 거두었다. 따라서 최종선형은 1차 모형시험 및 수치계산 결과로 확인된 바람직하지 못한 조파특성을 개선하기 위해 주로 선수부의 늑골선 형상을 변화시킴으로써 저항성능을 개선하는데 노력을 집중하였다. 이는 수치계산 결과의 비교 검토를 통해 이루어졌으며, 차후 모형시험에서도 성능 개선이 확인되었다.

늑골선 형상 변환만으로는 저항성능 개선에 한계를 보였기 때문에 선수부 조파특성을 좀 더 개선시키기 위해서 늑골선 형상에서 선수파가 타고 올라가는 계획흘수선 윗부분의 플레어 각도를 줄여주었다. 그리고 벌브근처의 유동이 보다 유선형에 가까워지도록 벌브크기 및 형상을 최종수정을 하여 단면적 곡선을 확정하고 수치계산의 검증을 통하여 최종선형을 확정하였다. 이와 같은 선형개

1) 170,500 DWT: 모선(mother ship)

2) 180,000 DWT: 개발선(target ship)

선은 2차 모형시험에서 확실한 저항추진 성능 개선으로 확인되었다.

2.2.2 LCB에 따른 저항성능 변화

선형변환 과정은 상당히 많은 반복 절차와 수십여 차례의 시행착오를 거쳤지만 Fig. 1에서 보여주듯이 본 연구에서 수치계산 대상 선형은 9가지(A~I) 경우로 간주될 수 있다. 선형개발 과정에서 수치계산은 WAVIS 1.4를 활용하였으며, 계산조건은 모형시험 상황과 일치시켜 선형을 상대 비교하였다.

WAVIS를 이용하여 모형선의 저항을 추정할 때 모형시험을 수행했던 연구기관(MOERI)이 2차원 해석법을 사용하기 때문에 잉여저항계수 C_R 의 수치변화에 중점을 두었으며, WAVIS 1.4를 사용하여 수치계산을 수행할 때, 결과 값으로 얻어지는 점성압력저항계수(viscous pressure drag coefficient)인 C_{VP} 와 파형저항계수(wave pattern resistance coefficient)인 C_{WP} 의 합을 C_R 로 간주했다. WAVIS 1.4를 이용한 수치계산조건은 Table 1에 주어져 있다. 계산영역은 배의 수선간 길이(L_{pp})로 무차원화 하여 결정하였다.

Fig. 1 Resistance coefficients of developed hull forms by changing LCB(A~F) and frameline(G~I)

Table 1 Calculation conditions for WAVIS 1.4

Viscous flow analysis	Reynolds number	1.05E+7
	Upstream boundary	1.0
	Downstream boundary	2.0
	Lateral boundary	1.0
	No. of total grids	약 17만개
Potential flow analysis	First cell distance, y_1	0.0003
	Froude number	0.150
	No. of panels (length×width)	180×18
	Raised panel height	0.01222

앞에서 언급 했듯이 먼저 저속 벌크선의 선형설계개념 정립을 위해서 유사 늑골선 형상에 따른 LCB 위치변화가 수치계산상의 저항특성변화에 어떤 영향을 미치는지를 알아 볼 필요가 있었다. 통상 유사 늑골선을 갖도록 선형이 변환된 경우에는 LCB 위치가 선수 쪽으로 이동하면 조파저항 특성에는 불리한 반면, 형상저항 특성은 유리해진다고 알려져 있다.

수치계산의 결과 조파저항 경향은 앞서 언급한 통상적인 개념과 일치하지만, 형상저항에 대해서는 그 반대 결과를 얻었다. 이는 LCB의 위치가 선미 쪽으로 이동하면 할수록 선수부의 비만도가 감소하여 수선면 입사각이 줄어들어 수치계산상에서도 조파특성은 유리한 것으로 나타나나, 형상저항은 단순히 벌브를 고정된 상태에서 LCB를 선수 쪽으로 이동시키는 경우, 선수 어깨 부근의 형상이 과도하게 비대해지는 경향을 보임으로 인하여 특별히 개선된다고 보기 어려우며 오히려 나빠지는 경향을 보였다. 또한 저속비대선의 선수에서 발생하는 저항성분은 벌브의 크기, 배수량의 상하 배치 등에 따라 많이 달라지기 때문에 그 원인을 쉽게 단정하기 어렵다고 판단된다. 그리고 WAVIS 1.4의 점성유동계산은 자유수면 효과가 직접 반영되기 못하고, 실제 사용한 격자수로 미세한 형상저항의 차이를 정확히 추정하는 것에 한계가 있는 것으로 생각된다.

Fig. 1의 선형 A~F는 LCB를 이동시키며 생성된 선형이며, 이들에 대해 파형저항과 점성압력저항을 계산하여 비교하였다. 여기서 저항계수 목표치로 제시된 잉여저항계수는 170,500 DWT급 모

선의 수치계산과 모형시험결과의 차이를 고려하여 180,000 DWT급 개발선이 만족해야할 수치계산상의 잉여저항계수를 표시한 값이다.

Fig. 1의 수치계산 결과를 살펴보면 170,500 DWT급인 모선의 늑골선을 유지한 채 LCB 변화시켜 얻어진 선형들(A~F)로는 180,000 DWT급 개발선의 목표 저항계수를 얻을 수 없다는 것을 알 수 있었다. 그 주된 이유는 모선의 늑골선 형상을 유사하게 갖도록 하고 선형변환을 수행한 결과 LCB 위치가 선수 쪽으로 이동하면 할수록 조파특성은 목표 저항계수(C_R)를 만족시킬 수 없을 정도로 크게 불리해지는 것으로 나타났기 때문이었다. 하지만 일반배치 및 화물창 공간 확보의 용이성, 트림조건 등을 고려하여 LCB 3.35%를 1차 모형시험 선형으로 결정하여 선형 E (180BC_MNU_F2_2)로 모형시험을 수행하였다. 수치계산에서 예견된 바와 같이 모형시험에서도 조파특성이 매우 좋지 않은 것으로 관측되었고, 저항계수 또한 큰 것으로 나타나 계획 속력을 얻지 못하는 결과를 가져왔다.

본 연구와 같은 저속 비대 선형의 경우 통상 형상저항의 영향이 조파저항의 영향보다 훨씬 크다고 알려져 있지만 조파저항 또한 간과해서는 안 된다는 것을 수치계산 및 모형시험 결과로 확실히 인지할 수 있었다.

본 절의 A~F 선형까지 170,500 DWT인 최초 모선으로부터 부족 배수량을 “어느 부분에 어떻게 채워줄 것인가”에 따른 LCB 위치에만 관심을 가졌었지만 결과로 얻어진 선형이 계획속력을 만족시키지 못함에 따라 조파성능 측면에서 대폭적인 개선이 불가피하였고, 다음 절에서는 선수미 늑골선 형상의 변환을 통한 선형개발 과정에 대하여 설명하기로 한다.

2.2.3 늑골선 변환에 따른 저항성능 변화

앞 절에서 설명한 바와 같이 수치계산과 모형시험 결과로부터 조파성능 개선의 필요성이 제기되었고, 본 절의 G~I 선형은 선수부 계획흘수 부근 늑골선 형상을 많이 깎아 항아리 형에 가깝게 함으로써 수선면 입사각을 줄여주었다. 전체적인 선수형상은 U형으로 유지하면서 발지의 형상은 좀

더 V형으로 변화하였고, 선수 벌브의 크기를 증가시키며 기존 middle nose 형에서 plank 형으로 변화를 주었다. 그 결과 G~I 선형은 새로운 늑골선 형상으로 인해 기존의 A~F 선형들과 확연히 다른 저항계수를 가지는 것으로 추정되었다.

G 선형은 1차 모형시험을 수행했던 E선형을 모선으로 새로운 늑골선 형상을 적용시킨 선형이다. 수치계산 결과는 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 1차 모형시험 선형보다는 조파성능이 확연히 개선된 것을 확인할 수 있었다. H 선형은 G 선형에서 만족시키지 못했던 목표 저항계수를 만족시키기 위해 계획흘수 근처의 늑골선 형상을 조금 세워주고 선수부 늑골선 형상을 전체적으로 순정하여 얻은 선형으로서 수치계산결과 G 선형보다 조파특성이 더 개선되는 것을 볼 수 있었다.

마지막으로 I 선형에서는 H 선형의 벌브면적을 좀 더 증가시키고 선수 측면형상을 변환시켜 벌브형상을 최종 plank형으로 확정지었다. 또한 선미부의 반류분포 개선과 형상저항 감소 효과를 위해 선미 발지를 깎고, 1.5 station 부근의 선미 스케그 면적을 키워 주는 국부수정을 수행한 결과 수선면의 곡률개선에 따라 형상저항이 개선되는 효과를 기대하였으나, 조파특성이 약간 불리한 것으로 나타났다. 2차 모형시험은 I 선형 (180BC_MNU_FF)을 최종적으로 선택하여 수행하였으며, 계획속력을 만족하는 것으로 확인되었다. Fig. 2는 선형 E와 I의 선수부 형상 차이를 보이고 있다.

Fig. 2 Bow shapes of the hull form E (180BC_MNU_F2_2) and hull form I (180BC_MNU_FF)

3. 모형시험과 CFD의 결과 비교

본 장에서는 CFD 결과를 모형시험 결과와 직접 비교함으로써 수치계산 결과의 활용성을 검증하고자 한다. 두 개의 선형(E와 I)에 대하여 모형시험결과로 얻어진 각 속도별 잉여저항계수(C_R)와 WAVIS 1.4의 포텐셜 및 점성유동해석 결과로 얻어진 파형저항계수(C_{WP})와 점성압력저항계수(C_{VP})를 더한 값을 Fig. 3에 직접 비교하였다.

1차 모형시험을 수행한 180BC_MNU_F2_2 (선형 E)의 경우 15 knot에서부터 조파특성이 확연히 불리하게 나타나는 경향을 보이는데, 수치계산이 모형시험 결과를 재현하고 있을 뿐만 아니라 각 속도별 경향을 잘 보여주고 있다. 2차 모형시험을 수행한 180BC_MNU_FF (선형 I)의 경우는 16 knot 이상이 되어서도 조파저항의 급격한 증가는 보이지 않는데, 수치계산 또한 이러한 경향을 명확히 보여준다.

포텐셜 계산의 파형저항 값(C_{WP})은 배의 진행방향과 평행한 $y/L=0.13$ 에서의 파 스펙트럼으로부터 구해진 값이다. 이 값은 패널의 의존도가 심하여 Fig. 3에서의 수치계산 결과값(WAVIS 1.4의 $C_{WP} + C_{VP}$)에 hump와 hollow의 형태가 과장된 것으로 사료된다. 그러나 Fig. 3에서 주목하여야 할 것은 두 선형의 모형시험에서 보이는 잉여저항계수의 차이 및 경향을 수치계산 결과 (WAVIS

Fig. 3 Comparison of resistance coefficients of two hull forms by WAVIS 1.4 and model test

1.4의 $C_{WP} + C_{VP}$)가 거의 정확히 추정하고 있으며, 두 선형 사이에서 나타나는 차이를 잘 예측하고 있다는 사실이다. 또한 통상적으로 조선소에서 WAVIS 프로그램을 사용할 때, 설계속도에 대한 계산만을 수행하여 그 결과를 활용하는데, 전 속도구간에 대한 계산을 수행해야 할 필요성을 보여준다. 저속구간에서 점성저항이 대부분이며, 조파저항은 속도가 증가할수록 커진다. 그러므로 조파저항과 점성압력저항의 속도별 특성을 동시에 검토하게 되면 설계속도에서의 저항성능 개선이 형상저항 측면에서 검토되어야 하는지 아니면 조파저항 측면에서 개선방향을 모색해야 하는지 명확해지고, 이를 바탕으로 선형 개선을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

앞에서 언급한 두 선형의 구체적인 조파특성 개선은 이어지는 Figs. 4~6에서 보이고 있는 모형시험과 수치계산의 결과들에서 확인 할 수 있다.

Fig. 4 Wave profile of 180BC_MNU_F2_2

Fig. 5 Wave profile of 180BC_MNU_FF

Fig. 6 Comparison of calculated wave patterns using WAVIS 1.4 between 180BC_MNU_F2_2 and 180BC_MNU_FF model

Fig. 7 Comparison of calculated wave profiles along hull surfaces of 180BC_MNU_F2_2 and 180BC_MNU_FF

1차와 2차 모형시험을 수행한 두 척의 모형선에 대하여 각 속도별로 수행한 포텐셜 유동계산 결과로 얻어진 선측파형을 Fig. 7에 도시하였다. 1차 모형시험을 수행한 180BC_MNU_F2_2 (선형 E)의 경우 속도가 증가할수록 선측에서 뚜렷한 파의 형성이 나타나지만, 180BC_MNU_FF (선형 I)의 경우에는 16 knot를 지나면서 선측파형의 증가가 나타나는 것으로 예측되었다.

Fig. 8은 두 척의 모형선에 대한 각 속도별 반

Fig. 8 Comparison of calculated nominal wake distribution at the propeller planes of 180BC_MNU_F2_2 and 180BC_MNU_FF model ships

Fig. 9 Comparison of axial velocity profile calculated at 0.7R of 180BC_MNU_F2_2 and 180BC_MNU_FF model ships

류 분포를, Fig. 9는 15.4knot에서 추진기면 반경 0.7R의 축방향 유속 분포를 비교한 그림이다. WAVIS 1.4를 이용하여 얻은 반류분포는 180BC_MNU_FF(선형 I) 즉, 2차 모형시험 선형이 1차 모형시험 선형인 180BC_MNU_F2_2(선형 E)에 비해 회전방향 120° 부근에서 속도가 줄어드는 구역이 다소 나타나긴 하지만 전체적으로 반류 분포가 좀 더 동심원 형상에 가깝고 계획속도에서 0.7R 부근에서 속도가 감소하는 영역이 줄어들어 실제 모형시험에서 추진성능이 더 개선된 것으로 볼 수 있다.

이러한 수치계산 결과를 선형개발에 체계적으로 활용하기 위해서는 여러 가지 사항을 함께 고려해야 하는데, 이를 정리해보면 다음과 같다.

첫째는, CFD 계산을 위해서 제일 먼저 고려되어야 하는 선체 표면격자의 형상과 공간격자의 개수 및 반복 계산의 횟수 등을 물리적인 시험과 비교하여 최적계산조건으로 표준화하는 것이 필요하다.

둘째는, 난류모형 및 자유수면 처리기법 등에 의한 수치계산의 한계점을 인식하고 시험과 경험을 통한 수정사항이 함께 고려되어야 한다.

셋째, 자유수면을 고려한 계산을 통해 얻어진 결과들을 자유수면을 대칭면으로 가정하여 얻어진 계산결과들과의 비교 분석하여, 그 결과들을 보정, 실제의 반류분포 예측에 활용하는 것이 좋다.

4. 선체 주위 유동장에 대한 자유수면 효과

WAVIS 1.4의 경우에는 포텐셜 유동해석을 통해 조파저항 및 파형정보를 얻고, 점성유동해석에서는 자유수면 효과를 반영하지 못한다. 하지만 실제 모형시험에서는 점성유동장과 조파현상이 상호 관련이 있고 영향을 주기 때문에 조파현상을 포함한 점성유동장의 해석이 바람직하다. WAVIS 2.0(Park et al. 2004)등에서는 이러한 개선이 이루어져 있는데, 계산 용량 및 시간의 제약으로 통상 조선소에서 사용하기에는 어려움이 있다. 본 장에서는 이러한 자유수면 효과가 실제로 점성유동에 어떠한 영향을 미치는 지를 WAVIS 2.0 프로그램을 활용하여 규명하고자 한다.

Table 2 Parameters for using WAVIS 2.0

Reynolds number		1.05E+7
Upstream boundary		1.0
Downstream boundary		2.0
Lateral boundary		1.0
No. of total grids	with free surface	약 300만개
	without free surface	약 230만개
First cell distance, y_1		0.0003
Number of iteration		10,000
Time steps		0.005

자유수면의 영향만을 구분하여 검토할 목적으로 WAVIS 2.0을 사용하여 점성 유동장 계산조건을 같게 하고 자유수면을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대한 계산을 수행하였다. 전자는 계획 흘수선(DLWL) 위까지 격자를 생성하여 level-set 방법을 사용하여 자유수면의 형상을 구하였으며, 후자는 계획흘수선까지만 격자를 생성하고 대칭조건을 부여하였다. 각 경우에 대한 수치계산 조건은 Table 2에 보였다.

4.1 선체표면의 압력변화

자유수면 유무에 따른 선체 표면압력 분포의 변화를 살펴보면 자유수면을 고려하지 않은 수치계산 결과와 자유수면을 고려하여 수치계산을 수행한 결과는 상당한 차이를 보였다.

수치계산 대상으로는 1차 모형시험을 수행한 바 있는 180BC_MNU_F2_2 (선형 E)를 선택하였다. 이는 저속비대선임에도 불구하고 조파특성이 나쁘게 나타났기 때문에 자유수면의 효과를 확인하는데 적합하다고 판단되었기 때문이다.

Fig. 10를 살펴보면 자유수면을 고려한 점성유동 계산이 자유수면을 고려하지 않은 경우보다 선수벌브 위치에서 선수파가 지나는 윗부분의 양압력 즉, 유속의 정체구간의 면적이 증가했고 선수 어깨부의 음압력 영역이 더 넓게 퍼져 있다. 선미부 또한 선수부와 마찬가지로 음압력 분포가 자유수면을 고려한 선형이 자유수면을 고려하지 않은 선형보다 더 넓게 퍼져있는 것을 확인할 수 있었다.

선수부는 증가된 양압력을 선수 어깨부의 증가

Fig. 10 Comparison of Pressure distribution calculated with and without free surface

된 음압력으로 어느 정도 압력의 균형을 유지할 수 있지만 선미부는 점성압력저항 측면에서 불리하게 작용할 수 있다는 결과를 그림을 통해 확인할 수 있었다.

Fig. 11 Comparison of viscous boundary layers near stern calculated with and without free surface

4.2 점성경계층의 변화

다음은 점성경계층의 형성에 자유수면이 어떤 영향을 미치는가에 대하여 살펴보기로 한다. Fig. 11은 15.4knot($Fn = 0.1491$)에서 자유수면이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 선미부의 4개의 station에서 점성 경계층을 도시하였다. 자유수면을 무시하고 계산된 결과가 자유수면을 고려한 결과보다 선미 벌브 아래 부분에서 유속이 느리며, 갈고리 모양(hook-like shape)의 저속영역 및 선체 주위의 속도분포에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이는 선미 추진기 부위에서의 반류 분포에 영향을 줄 것으로 생각된다.

4.3 추진기면의 반류분포 변화

위의 점성경계층의 변화에서 예측할 수 있듯이 Fig. 12의 추진기면 반류 분포와 Fig. 13의 0.7R에서의 축 방향 유속의 각도별 분포를 살펴보면

Fig. 12 Comparison of nominal wake distribution calculated with and without free surface

Fig. 13 Comparison of axial velocity profile calculated at 0.7R with and without free surface

자유수면을 고려한 수치계산 결과가 자유수면을 무시한 경우와 비교했을 때 전체적으로 비슷한 경향을 보이지만 프로펠러면 아래 부분에서는 유속이 조금 더 빠른 것을 확인할 수 있었다. 이는 모형시험을 통한 반류분포와 비교했을 때 더 근접하는 경향을 보인다.

5. WAVIS 1.4와 2.0의 계산결과 비교

다음은 WAVIS 1.4를 사용한 통상의 수치계산 결과와 WAVIS 2.0을 사용한 수치계산 결과를 직접비교해 보기로 한다. Table 3에 두 프로그램에서 사용된 점성유동장 해석법상의 차이를 명시하였다. 하지만 WAVIS 1.4의 계산에서 사용된 수치계산 격자계의 수가 WAVIS 2.0의 경우보다 훨씬 적다는 것과 WAVIS 1.4의 경우 얻어진 파형은 포텐셜 유동해석인 관계로 점성의 효과가 배제된 결과임을 감안하여야 할 것이다.

1차 모형시험 선형인 180BC_MNU_F2_2(선형 E)와 2차 모형선형인 180BC_MNU_FF(선형 I)를 대상으로 WAVIS 1.4와 WAVIS 2.0의 수치계산 결과를 15.4Knot($F_n=0.15$, $Re=1.05 \times 10^6$)에서 비교해보았다. 우선 Fig. 14의 선측파형 예측 결과를 살펴보면, 선수의 첫 번째 파정에서는 격자계의 밀집도 차이에 의해 다소 차이를 보이나 파저는 유사함을 확인할 수 있다. 포텐셜 유동 해석(WAVIS 1.4)의 결과와 점성유동해석(WAVIS 2.0)의 결과로 얻어진 선측 파형에서 약간의 차이가

Fig. 14 Comparison of calculated wave profiles using WAVIS 1.4 and WAVIS 2.0

있음을 알 수 있는데, 이는 점성의 영향을 고려한 WAVIS 2.0과 포텐셜 유동으로 계산된 WAVIS 1.4 사이의 지배방정식의 차이로 볼 수 있으나, 그 보다는 점성유동을 계산하기 위한 격자계는 선체 근처에서 매우 조밀하게 분포되어 있으나, 포텐셜 유동해석에는 선체표면 근처에서 상대적으로 조밀하지 못하여 나타난 결과로 보는 것이 타당할 것이다.

Fig. 15의 추진기면에서의 반류분포를 살펴보면, 자유수면을 무시한 WAVIS 1.4와 자유수면을 고려한 WAVIS 2.0의 반류분포 계산 결과가 모형시험 결과와 비교했을 때 두 결과 모두 프로펠러면 아래쪽에서는 유속이 더 빠르지만 위쪽에서는 느리게 예측되었다. 이는 자유수면 효과로 볼 수 없으며, 점성유동 계산을 위해 채택한 수치계산 방법과 격자계 및 난류 모형의 한계로 설명할 수 밖에 없다.

Table 3 Key features of WAVIS 1.4 and 2.0

구분	WAVIS 1.4	WAVIS 2.0
Governing equation	Incompressible RANS Eqn.	
Turbulence model	Realizable k- ϵ model w/ Launder & Spalding's wall function	
Discretization	Cell centered FVM	
	QUICK	MUSCLE
Velocity/Pressure coupling	SIMPLE Algorithm	
Free surface problem	Potential flow analysis with nonlinear FS condition(raised panel method)	Viscous flow analysis including free surface (level-set)

Fig. 15 Comparison of calculated wake distribution using WAVIS 1.4 and WAVIS 2.0

하지만 자유수면을 고려하여 계산된 WAVIS 2.0의 결과가 자유수면을 무시하여 계산된 WAVIS 1.4의 결과보다 회전방향 $45^\circ \sim 135^\circ$ 와 $225^\circ \sim 315^\circ$ 위치에서는 모형시험 결과와 더 근접한 경향을 보였음을 밝혀둔다.

6. 결 언

본 논문에서는 CFD를 활용하여 180,000 DWT급 벌크 화물선의 선형을 개발한 과정과 그 과정에서 밝혀진 CFD 계산과 모형시험 결과의 차이점과 활용 방안, 점성유동계산에서 나타난 자유수면 효과, 그리고 WAVIS 1.4와 2.0의 차이점 등에 대하여 정리하였다.

· 벌크화물선과 같은 저속비대선의 선형개발에서도 조파저항의 특성에 관한 검토가 필요하며, 저항성능이 우수한 LCB의 위치는 늑골선 형상 및 벌브 크기 등 주요 설계 개념에 따라 달라지고 선수부의 늑골선 형상이 조파저항뿐만 아니라 형상저항에도 적지 않은 영향을 미침을 확인하였다.

· 두 척의 벌크화물선 선형에 대한 모형시험과 수치계산 결과를 비교한 결과, WAVIS 1.4의 포텐셜유동해석 결과로 얻어지는 파형저항계수(C_{WP})와 점성유동해석으로 얻어지는 점성압력저항계수(C_{VP})를 합한 값이 모형시험에서 얻어지는 잉여저항계수(C_R)의 경향을 그대로 재현하였으며, 또한 두 선형 간의 차이를 정확히 예측할 수 있는 것으로 파악되었다.

· WAVIS 2.0을 활용하여 자유수면을 고려한 경우와 자유수면을 무시하고 계산한 점성유동해석의 결과를 비교하면 선수부와 선수 어깨근처에서는 뚜렷한 압력분포 및 유선의 차이를 보였다. 선미부에서는 상대적으로 작은 차이를 보이거나 저항계수도 차이를 나타내는 것으로 보인다.

· 유동해석 수치계산 프로그램인 WAVIS 1.4 및 2.0은 모두 선형개발에 유용한 것으로 평가되며, 정성적인 면은 물론 정량적으로도 활용 가능한 것으로 보인다. 또한 설계속도뿐만 아니라 전제속도 구간에서 계산을 수행할 경우 그 활용도가 보다 높아질 것으로 예상된다. 하지만 자유수면 효과에 의한 저항특성 변화 및 WAVIS 버전별 차이점을

정확히 인지하고 접근해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업과 목포대학교 중형조선산업지역혁신센터(RIC)의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- Kim, D.H., Kim, W.J. and Van, S.H., 2000a, "Analysis of the Nonlinear Wave-Making problem of Practical Hull Forms using Panel Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 4, pp. 1-10.
- Kim, W.J., Kim, D.H. and Van, S.H., 2000b, "Development of Computational Methods for Viscous Flow around a Commercial Ship using Finite-Volume Methods," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 4, pp. 19-30.
- Kim, W.J. Kim, D.H. and Van, S.H., 2000c, "Development of Wave and Viscous Flow Analysis System for Computational Evaluation of Hull Forms," Journal of Ship and Ocean Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 33-45.
- Lee, C.J., 2000, Master Thesis, Chungnam National University.
- Park, I.R., Kim, J. and Van, S.H., 2004, "Analysis of Resistance Performance of Modern Commercial Ship Hull Form Using a Level-Set Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 2, pp. 79-89.

< 박 현 석 >

< 김 병 남 >

< 김 우 준 >