

정수중 부선 주위의 유동 특성에 관한 연구

†이상민 · 정우철* · 김현수**

† 군산대학교 해양생산학과 교수, *,**인하공업전문대학 선박해양시스템과 교수

Study on the Flow Characteristics around a Barge in Still Water

† Sang-Min Lee · Uh-Cheul Jeong* · Hyun-Soo Kim**

† Dept. of Marine Science and Production, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea
*,**Dept. of Ship & Ocean System, Inha Technical College, Incheon 402-752, Korea

요 약 : 정수중 부선 주위의 유동 특성을 조사 및 분석하기 위하여 부선의 저항성능을 모형시험과 CFD를 이용한 수치계산에 의하여 해석하였다. 모형시험은 무한수심 조건에서의 회류수조에서 저항과 선측과형 등을 관측하였으며, 유동장 해석을 위하여 VOF(Volume of Fluid)법을 기초로 한 수치 시뮬레이션을 이행하였다. 부선의 형태에 따르는 유동특성을 파악하기 위하여 서로 다른 모습의 부선 모형을 제작하였으며, 모형시험은 설계속도를 7kts로 정하고 역조와 순조의 조류 영향을 고려하여 5kts~10kts의 구간에서 실험을 실시하여 각 속도에 따르는 저항 특성을 비교·검토 하였다. 수치 시뮬레이션은 일정 속도에서 만재상태를 기준으로 하여 계산을 수행하였으며 수조 실험 결과와 상호 비교함으로써 본 수치계산법의 타당성을 검증할 수 있었으며, 부선의 저항성능 및 선체 주위 유동장의 특성을 분석하였다. 저속일 때 25% 정도의 저항의 차이가 발생하고, 7kts부터 유효마력이 급격히 증가하는 현상을 파악할 수 있었다.

핵심용어 : 부선, 저항성능, 유동특성, 전산유체역학, VOF법, 모형시험

Abstract : In this study, the resistance performances of barge are analyzed by model tests and computation using CFD to investigate the flow characteristics around a barge in still water. The model tests are carried out in infinite depth in Inha Technical College Circulation Tank to observe the resistance and the numerical simulations based on VOF(Volume of Fluid) method are performed to analyze the flow around the barge. We have selected two barge models to investigate the flow characteristics according to the different type of barges. The experiments are carried out with the models from 5kts to 10kts(designed speed 7kts) considering the effect of adverse and favorable current. The numerical simulations are performed to analyze the flow and resistance characteristics of barge in the full loaded condition with the target speed and compared with the experimental data to confirm the reliability of the numerical method. The result was that the difference of resistance with 25% occurred at low speed and EHP increased rapidly from 7kts.

Key words : barge, resistance performance, flow characteristics, CFD, VOF, model test

1. 서 론

다양한 분야에서 유용하게 활용되고 있는 예부선은 그 작업 환경상 많은 어려움과 위험에 노출된 채 해상운송업무를 수행하고 있다. 이러한 어려운 환경속에서 안전하고 효율적인 예항업무를 지원하기 위해서는 사전에 예부선에 대한 과학적인 데이터를 충분히 확보하여 이를 토대로 한 예인 업무의 자료로서 활용하여야 한다.

이와 관련하여 예부선의 해상에서의 안전 운항을 위한 예부선의 사고분석 및 예방기술 등에 관한 연구들이 활발히 진행중에 있다. 예부선 운항시뮬레이션의 가시화 기술 개발을 위한 연구(황 등, 2009), 예부선의 동역학 모델링을 통한 조종성능 추정법에 관한 연구(김 등, 2009b) 등에 의한 예부선의 시뮬레이션 기법이 향상되고 있으며, 사고 사례 분석을 통한 예부선의 안전

운항 개선 방안이 제안되고 있다(김 등, 2009a; 나 등, 2009).

특히 부선 운송 형태에서 가장 일반적인 형태인 선미예인의 경우 실해역에서의 정확한 예인력의 추정이 매우 중요하다고 할 수 있다. 예인력을 추정하기 위해서는 우선 예선과 부선의 저항성능 및 예부선 주위의 유동장 특성을 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 첫 번째 단계로서 정수중 부선 주위의 유동 특성을 조사 및 분석하기 위하여 부선의 저항성능을 모형시험과 CFD를 이용한 수치계산에 의하여 해석하고자 한다. 모형시험은 무한수심 조건에서의 회류수조에서 저항과 선측과형 등을 관측하였으며, 유동장 해석을 위하여 VOF(Volume of Fluid)법을 기초로 한 수치 시뮬레이션을 이행한다. 부선의 형태에 따르는 유동특성을 파악하기 위하여 서로 다른 모습의 부선 모형을 제작하였으며 각 속도에 따르는 저항 특성을 비교·검토 하였다. 비선형 점성유체 문제를 해결할 수 있는

† 교신저자 : 종신회원, smlee@kunsan.ac.kr 063)469-1814
* 연회원, ucjeong@inhac.ac.kr 032)870-2176
** 연회원, hyunsookim@inhac.ac.kr 032)870-2172

수치 시뮬레이션은 일정 속도에서 만재상태를 기준으로 하여 계산을 수행하였으며 수조 실험 결과와 상호 비교함으로써 본 수치계산법의 타당성에 대하여 논의하며, 부선의 저항성능 및 선체 주위 유동장의 특성을 분석하고자 한다.

의 5, 6, 7, 8, 9, 10kts의 선속에 해당하는 저항을 측정하였다. 모형선에 작용하는 전저항 계측값(Fig. 2), 모형선의 전저항계수(Fig. 3), 모형선의 잉여저항계수(Fig. 4), 실선의 전저항(Fig. 5), 실선의 유효마력(Fig. 6)이 각각의 그림에 나타나고 있다.

2. 모형 실험

2.1 부선의 모델 및 실험 조건

부선 주위의 유동 특성을 조사 및 분석하기 위하여 부선의 저항성능을 모형실험과 수치계산에 의하여 해석하였다. 모형실험은 무한수심 조건에서의 회류수조에서 저항과 선속파형 등을 관측하였으며, 설계속도를 7kts로 정하고 역조와 순조의 조류 영향을 고려하여 5kts~10kts의 구간에서 실험을 실시하여 각 속도에 따르는 저항 특성을 비교·검토 하였다.

부선의 저항성능을 추정하기 위한 모형실험은 인하공업전문대학의 회류수조에서 실행하였으며, 현재 가장 많이 실무에서 사용되고 있는 2가지 선형의 부선 모델로서 1/50 축척으로 제작된 모형을 이용하였다. 자세한 제원 및 모습은 Table 1과 2, Fig. 1에 표시되어 있다. 예선의 예인마력을 추정하기 위하여 동일한 흘수상태(만재 및 경하)에서의 각각 모형선을 실선에서

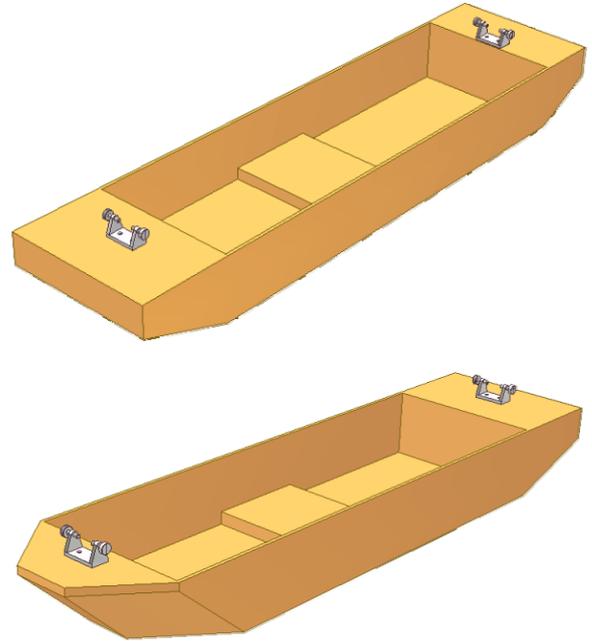


Fig. 1 Drawing of KNU-001(up), 002(down)

Table 1 Main particulars for KNU-001 model

| Condition | Full load condition | | Ballast load condition | |
|--------------------------------|---------------------|---------|------------------------|---------|
| | Actual | Model | Actual | Model |
| Loa (m) | 50.0 | 1.0 | 50.0 | 1.0 |
| Lbp (m) | 50.0 | 1.0 | 50.0 | 1.0 |
| Lwl (m) | 50.0 | 1.0 | 42.1 | 0.841 |
| B (m) | 12.0 | 0.24 | 12.0 | 0.24 |
| d (m) | 2.8 | 0.056 | 1.0 | 0.02 |
| Cb | 0.8772 | | 0.8273 | |
| Wet. S (m ²) | 861.0 | 0.3444 | 589.0 | 0.2357 |
| Displacement (m ³) | 1,474.0 | 0.01179 | 496.393 | 0.00397 |

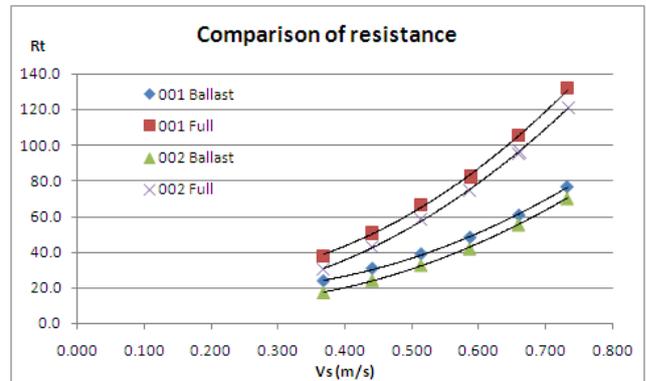


Fig. 2 Measured total resistance Rt(gr)

Table 2 Main particulars for KNU-002 model

| Condition | Full load condition | | Ballast load condition | |
|--------------------------------|---------------------|---------|------------------------|---------|
| | Actual | Model | Actual | Model |
| Loa (m) | 50.0 | 1.0 | 50.0 | 1.0 |
| Lbp (m) | 50.0 | 1.0 | 50.0 | 1.0 |
| Lwl (m) | 50.0 | 1.0 | 41.28 | 0.8257 |
| B (m) | 12.0 | 0.24 | 12.0 | 0.24 |
| d (m) | 2.8 | 0.056 | 1.0 | 0.02 |
| Cb | 0.8267 | | 0.7592 | |
| Wet. S (m ²) | 760.0 | 0.3038 | 580.69 | 0.2322 |
| Displacement (m ³) | 1,389.0 | 0.01111 | 455.4987 | 0.00364 |

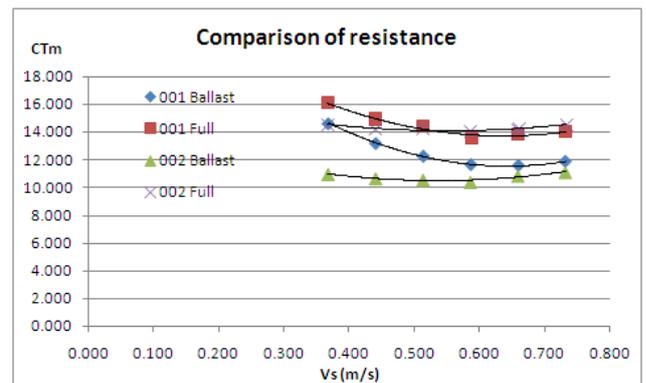


Fig. 3 Total resistance coefficient, Ctm(10⁻³)

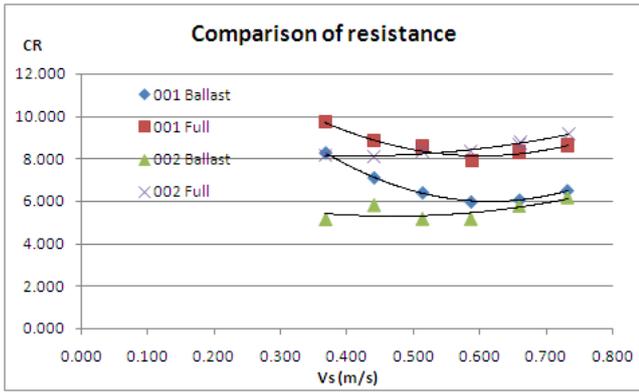


Fig. 4 Residual resistance coefficient, $Cr(10^{-3})$

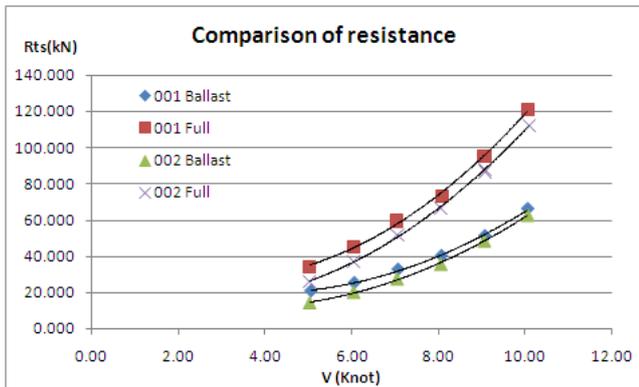


Fig. 5 Total resistance, $Rts(KN)$

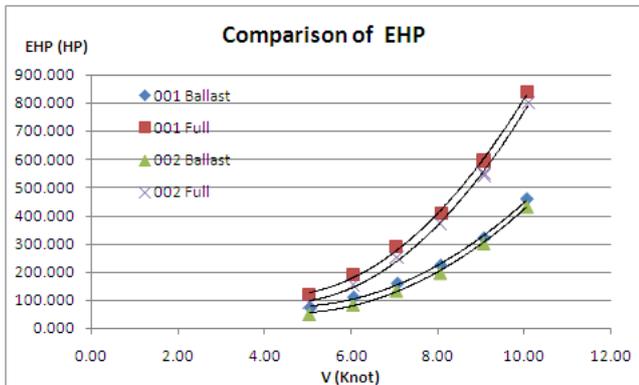


Fig. 6 EHP curve (HP)

2.2 결과 및 고찰

실선의 저항추정을 위하여 본 연구에서는 ITTC-1957 실선모델 상관 관계를 적용하여 해석하였다.

Fig. 3의 모형의 전저항 계수(C_{tm})를 살펴보면 만재상태에서 <001>모델과 <002>모델 사이에는 0.367m/s(실선의 5kts)를 제외하고 전반적으로 큰 차이가 보이지 않는다. 그러나 경하상태인 경우 0.367m/s에서 <001>보다 <002>모델이 25%정도 감소되고, 0.732m/s(실선의 10kts)에서는 7%가량 감소되고 있음을 확인 할 수 있다.

저속의 경하상태에서 조파저항을 포함하는 잉여저항 성분

(Fig. 4)은 <001>모델이 <002>모델보다 월등히 높기 때문에 전체적인 저항값이 <001>모델에서 크게 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 만재상태와 경하상태 모두 고속으로 될수록 점차 감소하는 경향을 보여준다.

선수형상의 영향으로 <002>모델의 선박이 <001>모델 선박보다 저항능력이 전반적으로 우수하며 저속상태일 때 및 경하상태일 경우 그 특성이 더욱 크게 나타나고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 4에서 보여지는 잉여저항 성분 중 <001>모델의 잉여저항이 8kts에서 hollow 현상이 발생하지만 실선의 유효마력은 7kts에서 8kts가 되었을 경우 약 30%의 마력증가 현상이 발생하므로 해상상태, 연료소비량, 예비마력 등을 종합적으로 고려하여 운항속도를 선정할 필요가 있을 것으로 판단되어진다.

Fig. 6을 살펴보면, <001>모델의 경우 경하상태에서 만재상태가 될 경우 5kts에서 65%, 7kts에서 81%, 10kts에서 83%씩 각각 추가적인 유효마력의 증가가 필요한 것으로 나타난다. <002>모델에서도 거의 유사한 성향을 보여주고 있다. 설계속도 7kts부터 마력증가가 급속히 커지므로 적재상태별 경제적인 운항속도를 선정하여 효율적인 예부선 업무를 수행해야 할 것으로 판단된다.

모형선<001>의 선측 파형의 모습은 Fig. 7(5kts), Fig. 8(7kts), Fig. 9(10kts)에 나타나고 있다. 7kts에서부터 선수부에 주름 형태의 선수가 생성되는 것을 확인 할 수 있고, 이것은 선속의 증가와 함께 더욱 크게 형성되어 선수부에서 전진하는 현상을 보여준다.

일반적인 유선형 형태를 지닌 선박이 폭이 좁은 수로를 통과할 경우 측벽의 영향으로 인하여 선박이 진행하는 앞쪽에 solitary wave가 발생하여 선박보다 먼저 앞쪽으로 전파되는 모습이 나타난다. 본 실험에서 사용된 형태의 부선이 좁은 수로를 통과할 경우에는 더 큰 solitary wave가 발생하여 전파되어 질 것으로 판단되어진다.

Fig. 10~12는 <002>모형선이 5kts, 7kts 및 10kts로 항주할 경우에 발생하는 선측 파형의 모습을 보여주고 있다.



Fig. 7 Wave patterns for KNU-001 (full load condition, $V=5$ knots)

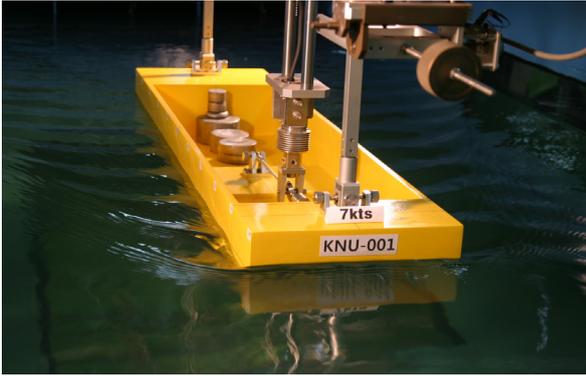


Fig. 8 Wave patterns for KNU-001 (full load condition, V=7 knots)



Fig. 12 Wave patterns for KNU-002 (full load condition, V=10 knots)



Fig. 9 Wave patterns for KNU-001 (full load condition, V=10 knots)

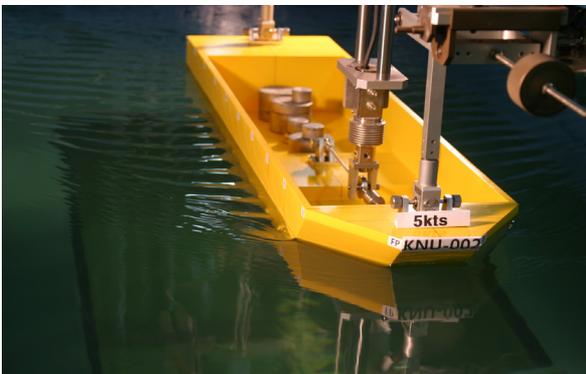


Fig. 10 Wave patterns for KNU-002 (full load condition, V=5 knots)



Fig. 11 Wave patterns for KNU-002 (full load condition, V=7 knots)

3. 수치 시뮬레이션

최근에 CFD 기술을 이용한 시뮬레이션 방법은 비선형성 물리 현상의 이해를 기본으로 한 선박 및 해양 구조물의 비교 평가가 가능하며 이들의 최적화 설계와 안전성을 위한 내항성능이 뛰어난 선박의 설계과정에서 유용하게 사용되고 있으며, 실제로 선체주위의 유동장을 매우 잘 구현해 내고 있다. 본 연구에서는 선박주위의 유동장을 완전 비선형 조파문제를 포함하는 점성을 고려한 난류 자유수면의 해석이 가능한 CFD를 이용하여 시뮬레이션 함으로서 부선 주위의 압력변화로 인한 부선의 저항성능을 보다 정량적으로 예측하고자 한다.

선박과 유체의 간섭효과 계산시 자유표면의 비틀림, 쇄파현상, 유체의 압축효과, 물체의 탄성변형 등 복잡한 유체현상이 주된 어려움이 된다. 이와 같은 수치계산의 어려움을 해결하고, 부선 주위의 파형뿐만 아니라 부선으로 부터 원거리로 전파해 가면서 부선의 항행에 영향을 미치는 파를 정확히 구현해 내기 위해서 VOF(Volume of Fluid) 알고리즘을 자유표면의 운동학적 경계조건을 해결하기 위해서 적용한다. 그리고 이러한 VOF법을 자유표면 해석에 적용하여 그 유효성을 검증한 연구 또한 다수 있다(남 등, 2007; 김 등, 2005; 유 등, 2005).

본 연구에서는 부선 주위의 유동장 해석을 위하여 Fluent를 이용하여 수치계산을 실시하였다. 기본 알고리즘은 일정한 그리드 안에서 액체와 공기의 비율에 의해 만들어지는 경계면이 자유표면을 형성토록 하는 수치해석 기법인 VOF법을 이용하였다.

Fig. 13에 시뮬레이션에 사용된 격자계를 나타내고 있으며, Fig. 14와 Fig. 15에는 <001>모델이 만재상태에서 10kts로 항주하고 있을 때의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션은 실선의 1/50 스케일 모형선을 대상으로 $Rn\ 5.07 \times 10^6$ 상태에서 실행하였다.

모형선의 수조실험 결과인 Fig. 9와 비교하여 보면 선수부 및 선측에 발생하는 파형을 시뮬레이션에 의해서도 매우 잘 구현해 내고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 설계 속력 7kts에서의 전저항 계수 값은 13.436×10^{-3} 으로 모형실험에 의해 얻어진 값 14.396×10^{-3} 과 유사한 결과를 보여주고 있다. 이와 같이 실험 결

과와의 종합적인 비교를 통해 본 연구에서 사용된 수치계산법의 타당성을 확인 할 수 있다.

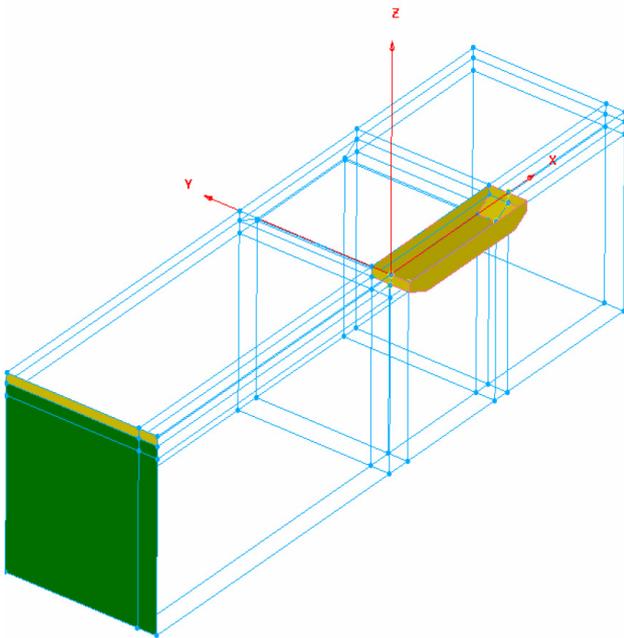


Fig. 13 Grid system for KNU-001

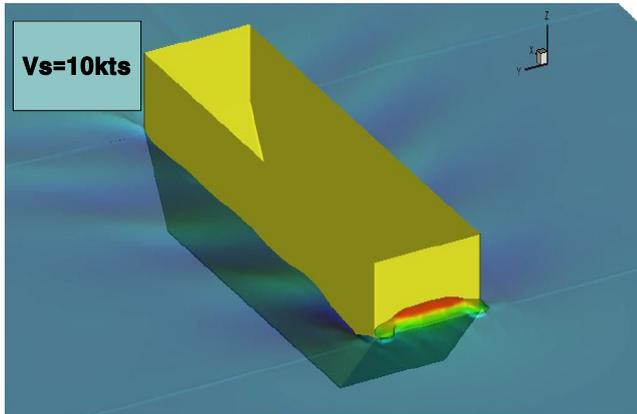


Fig. 14 Wave patterns for KNU-001
(full load condition, V=10 knots)

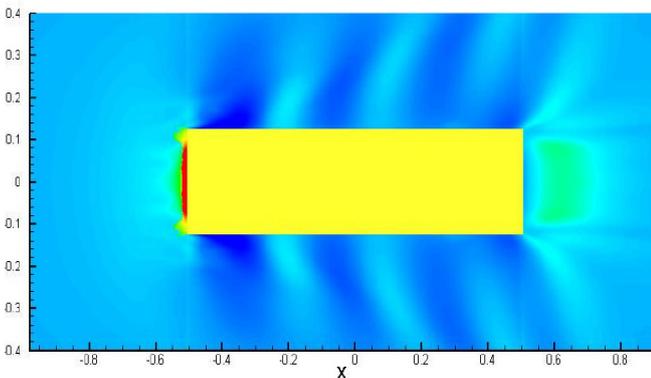


Fig. 15 Perspective views of wave pattern of KNU-001
(full load condition, V=10 knots)

4. 결 론

본 연구에서는 모형실험 및 수치계산에 의해 정수중 부선 주위의 유동해석을 실시하였으며, 이를 통하여 객관적이고 정량적으로 부선의 저항추진 성능을 파악할 수 있었다. 먼저 회류수조에서 모형실험을 실시한 후, 실험에서 얻어진 데이터와의 비교를 통한 수치계산의 유효성을 검증하고, 다른 형태의 예부선 선박 주위의 유동장 계산에 적용시켜 해결할 수 있는 가능성을 확인 하였다.

부선의 선수 형상에 의하여 저속일 때 25% 정도의 저항이 차이나는 현상을 모형실험을 통하여 파악할 수 있었으며, 저항의 차이는 고속으로 될 수록 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 유효마력은 7kts부터 급격히 증가하므로 적재상태별 경제적인 운항속력을 선정하여 효율적인 예부선 업무를 수행해야 할 것으로 판단된다.

부선 주위의 유동장 해석을 위하여 VOF법을 이용한 시뮬레이션 실행하였으며, 이러한 시뮬레이션은 향후 운하와 같은 협수로 및 천수역에서의 유체력 간섭 현상에 대한 수치해석 등 복잡한 형태의 지역을 항행하는 예선과 피예선에 작용하는 유체역학적 특성을 파악하는데 유용하게 적용할 수 있으리라 기대된다.

향후에는 예선 주위의 유동특성에 관한 조사·분석이 실시됨으로서 예부선의 종합적인 저항추진성능을 추정하여 안전한 예인업무가 이루어 질 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-331- F00046)

참고문헌

- [1] 김진, 박일룡, 김광수, 반석호(2005), "LNG운반선의 자유수면을 포함한 저항상태 난류유동장의 수치해석", 대한조선학회논문집 제42권 제6호, pp. 583~592.
- [2] 김세원, 정우리, 정태권(2009a), "예부선 안전운항 개선 방안(Ⅱ)", 한국항해항만학회 제33권 제2호 추계학술대회논문집, pp. 20~22.
- [3] 김연규, 여동진, 한성환, 김동진(2009b), "예부선의 동역학 모델링 및 조종성능 추정법 개발", 한국항해항만학회 제33권 제2호 추계학술대회논문집, pp. 40~41.
- [4] 나성, 김홍태, 김혜진, 하옥현(2009), "인적요인을 중심으로 한 예부선 사고사례 분석", 한국항해항만학회 제33권 제2호 추계학술대회논문집, pp. 29~31.
- [5] 남중호, 현범수, 김태운, 김대현(2007), "수퍼요트의 초기 선형 선정을 위한 유체성능해석 및 모델링기법", 대한조선학회논문집 제44권 제4호, pp. 451~458.
- [6] 유재훈, 반석호, 안해성, 김진, 김상현(2005), "30피트급 요트

의 선형개발 및 성능추정”, 대한조선학회논문집, 제42권 제1호, pp. 34~42.

- [7] 황호진, 문두환(2009), “예부선 운항 시뮬레이션 가시화를 위한 그래픽 렌더링 엔진 기술 동향 분석”, 한국항해항만학회 제33권 제2호 추계학술대회논문집, pp. 38~39.

원고접수일 : 2010년 4월 15일

심사완료일 : 2010년 8월 4일

원고채택일 : 2010년 8월 11일