

Ro-Pax 선형의 천수역에서 조파저항성능 평가를 위한 수치적 연구

홍춘범^{†*}, 신수철*, 김정중*, 최순호*

삼성중공업(주) 조선해양연구소*

A Numerical Study to Evaluate the Resistance Performance of a Ro-Pax Hull Form in Shallow Water

Chunbeom Hong^{†*}, Soochul Shin*, Jungjoong Kim* and Soonho Choi*

Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries*

Abstract

The effect of water depth on the wave making resistance performance is great where Froude number based on the water depth is close to one. The increase of wave making resistance due to the shallow water effect is evaluated by a numerical analysis in the present study. Three-dimensional Navier-Stokes and continuity equations are employed for the present study and the equations are discretized by finite difference method. The interface between water and air is determined by the level set method. In order to validate the numerical method, the change of resistance performance for Wigley hull according to the water depth is evaluated and the computed resistance coefficient is compared with measured one. The present numerical method is applied for the simulation of wave phenomena around a Ro-Pax hull form and the computed results are discussed in the resistance performance point of view.

※Keywords: Shallow water (천수역), Wave making resistance (조파저항), Level set method (레벨 셀법), Finite difference method (유한차분법)

1. 서론

선박의 저항성능은 수심에 따라 변하고 특히 수심(h) 기준 Froude 수(Fnh)가 1.0 근처에서는 조파저항 증가가 급격하게 나타난다. Millward and

접수일 2004년 5월 24일 승인일: 2005년 4월 4일

†주저자, E-mail : cb.hong@samsung..com

Tel : 042-8657-4782

Bevan(1986)는 Fnh 가 0.5 이상에서 현저한 저항의 증가를 보여주는 천수조에서의 모형시험을 수행하였다. 그러나 수조 옆 벽이 존재하므로 Fnh 가 1.0 근처에서는 저항계수의 결정이 어렵다고 보고하였다. 본 연구는 Dover 해협을 운항하는 Ro-Pax 선형의 설계속도에서 Fnh 가 0.7 보다 커져 저항성능에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되어 저항계수의 증가량을 정성적으로 파악하고자 한다.

조파현상을 해석하는 수치해석법은 크게 두 가지가 있다 자유수면을 뚜렷한 경계로 정의하여 자유수면의 움직임을 추적하는 interface tracking method 는 경계적합 좌표계를 사용하고 있어 격자계를 자유수면 형상에 따라 움직이므로, 격자계 재구성이 어렵고 복잡한 자유수면 현상을 해석하기에는 곤란한 점이 있다. 한편, 자유수면을 뚜렷한 경계가 아닌 일정한 폭으로 정의하고, 고정된 격자계에서 자유수면의 형상을 구하는 interface capturing method 는 격자계의 재구성이 필요 없기 때문에 복잡한 자유수면 현상을 해석하는데 장점이 있다. 본 연구의 목적은 천수역에서 Ro-Pax 주위의 조파현상을 수치해석하는 것으로 선미 transom 에서 발생하는 불연속한 자유수면이 예상되며 그러한 현상은 Fig. 1의 사각형 표시에서 잘 보여주고 있다. 이러한 조파현상 해석을 위하여, 자유수면이 transom 아래에 위치한다는 dry transom 으로 가정된 유동을 interface tracking method 로 해석(최희중 2001)한 바도 있으나 실제로 저속구간에서는 transom 에 물이 닿는 경우(wetted transom)가 발생하며, interface tracking method 를 이용한 해석에는 어려움이 있어 본 연구에서는 불연속한 자유수면의 해석과 transom 유동에 대한 특별한 가정이 없는 interface capturing method 중 하나인 level set method(Osher and Sethian 1988)를 적용하였다. 박일룡과 반석호(2003) 박일룡 등(2004)은 level set method 를 이용하여 일반상선의 자유수면을 수치해석하여 level set method 의 유용성을 잘 보여주었다.

본 연구에서는 Wigley 선형에 대한 수치해석과 모형시험과의 비교를 통한 수치해석법의 검증을 수행하고, Ro-Pax 선형의 천수역에서 조파저항

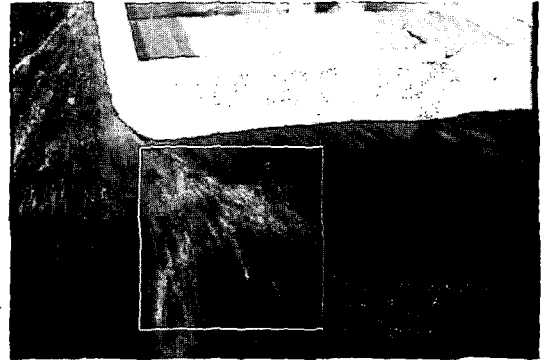


Fig. 1 Snapshot of wave phenomenon around transom

성능 변화를 수치해석을 이용하여 평가하였다.

2. 지배방정식 및 경계조건

지배방정식은 3 차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식(1) 및 연속방정식(2)이다

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v} + \vec{F} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2)$$

여기서 \vec{F} 는 중력을 포함한 외력을 나타낸다.

Level set method(Osher and Sethian 1988)를 이용하여 자유수면의 위치와 밀도를 계산하였다. 자유수면은 식(3)의 해로부터 얻어지고 얻어진 거리함수(ϕ)와 그로부터 얻어지는 밀도(ρ)를 지배방정식에서 반영하여 해를 구한다. 여기서 거리함수가 0 인 점을 자유수면으로 정의하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

선체표면, 측면 그리고 바닥의 경계조건은 계산 시간의 단축을 위하여 Hung(1987)등이 제안한 free-slip 조건을 사용하였다. 후방 경계에서 압력, 속도 그리고 자유수면에 대한 경계조건은 zero-gradient 조건을 사용하였다

3. 수치해석법 및 격자계 구성

지배방정식은 유한차분법에 의하여 차분화하고

계산 algorithm 은 Marker-and-Cell method 를 도입하였다. 식(1) 및 (3)의 대류항은 3 차 풍상차분법으로 그 외의 공간 미분항은 2 차 중심차분법을 사용하였다. 시간에 대한 미분항은 전진차분법을 이용하였다. 식(3)에 대한 수치해석 수행 시 물과 공기간의 간격을 일정하게 유지하기 위하여 재초기화가 필요하며 본 연구에서는 Sussman and Fatemi(1999)등이 제안한 방법을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 격자계는 상용 S/W 인 Gridgen 으로 생성되었다. 천수역의 바닥경계조건을 부여하기에 편리한 H-H type 의 격자계를 사용하였다. Fig. 2 는 Ro-Pax 선형의 격자계로서 격자점은 총 15 만(145X31X35)개이며 최소 격자의 크기는 길이, 폭, 깊이 방향으로 각각 배의 길이(L)의 0.01, 0.001, 0.001 배이다. 해석 정도 및 계산의 효율을 높이기 위하여 물체적합 좌표계를 사용하였으며 자유수면의 해석 정도를 높이기 위하여 자유수면 근처에 조밀한 격자계를 구성하였다.

4. 수치해석법 검증

수치해석법의 검증을 위하여 천수역에 대한 Millward and Bevan(1986)의 모형시험 자료를 사용하였다. 모형시험은 영국의 National Maritime Institute 에서 수행되었으며 심수역과 천수역에 대한 저항을 계측하였다. 저항 계측에 사용된 선형은 Wigley 선형으로 식(4)에 의하여 표현되는 수식선형이다.

$$\frac{y}{b} = \begin{cases} [1-4x^2][1-(\frac{z}{d})^2] & (-d \leq z \leq 0) \\ [1-4x^2] & (z > 0) \end{cases} \quad (-0.5L < x < 0.5L) \quad (4)$$

$L=1.905m, b=0.238m, d=0.095m$

자세변화가 구속된 상태에서 저항이 계측되었으므로 수치해석에서도 선박의 자세를 고정시켰다. 배의 길이 기준 Froude 수(FnL)로 0.25 에서 0.55 까지 수치해석을 수행하였으며 심수역인 경우와 천수역인 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 천수역의 경우 수심은 0.3175m 로 배 길이의 약 16.6%이고 수치해석 범위는 Fnh 가 0.61 ~ 1.341 이다.

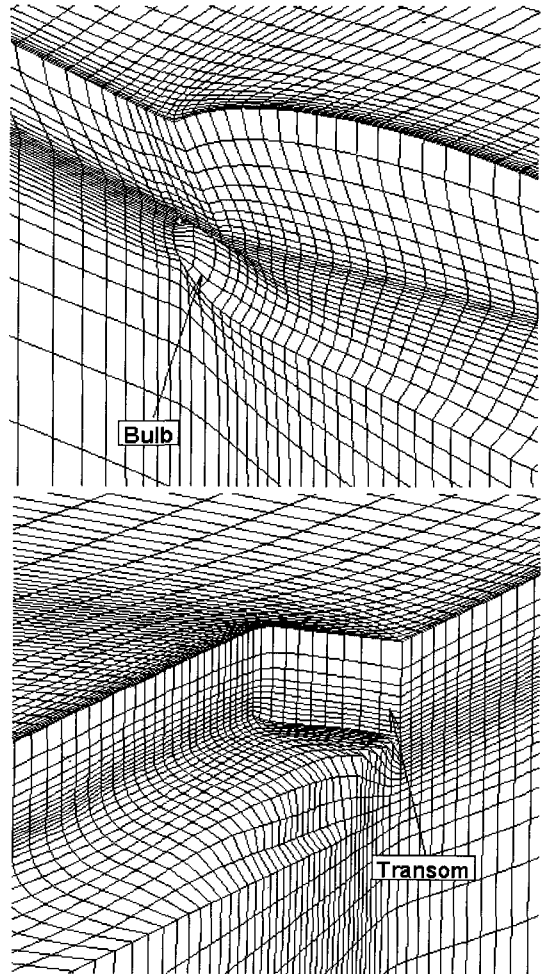


Fig. 2 Grid system around Ro-Pax

Figs. 3 ~ 5 는 심수역에서 FnL 에 따른 파고분포를 보여주고 있다. 파고(ζ)는 모형 scale 로 나타내었다. Kelvin wave system 이 잘 나타나고 있으며 선속이 커짐에 따라 발생하는 파정과 파저의 크기가 커지고 있음을 볼 수 있고 저항은 선속에 따라 증가할 것으로 예상된다. 모형시험과 같은 조건의 계산을 위하여 본 수치해석 영역의 폭을 모형시험을 수행한 수조와 같이 구성하였고 연직벽이 있다고 가정하였다.

천수역에서 파형을 Figs. 6 ~ 8 에 보인다. Fig. 6 은 Fnh 가 0.7 이하(sub-critical speed)의 파형을 보여주고 있으며 심수역의 파형(Fig. 3)과 크게 차이를 보이지 않고 있다. 그러나 Fnh 가 0.8

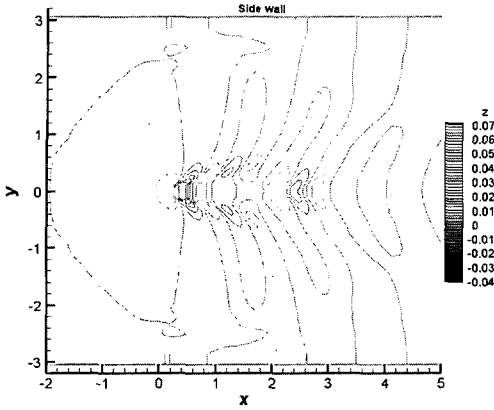


Fig. 3 Wave pattern around Wigley hull (FnL=0.25)

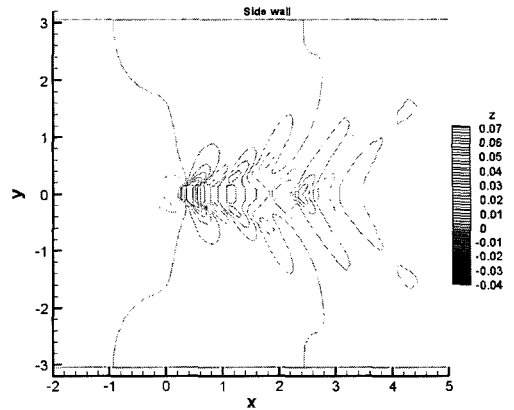


Fig. 6 Wave pattern around Wigley hull (FnL=0.25, Fnh=0.612)

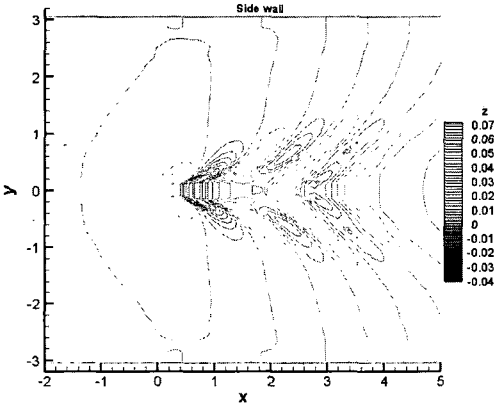


Fig. 4 Wave pattern around Wigley hull (FnL=0.35)

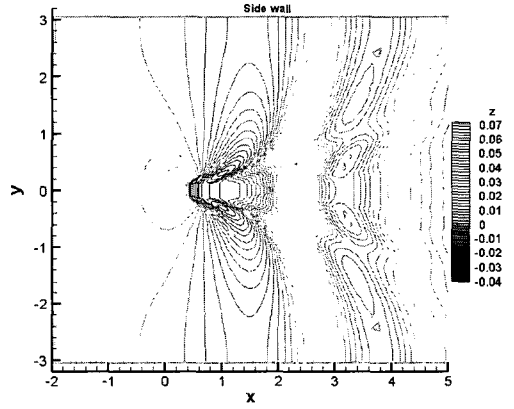


Fig. 7 Wave pattern around Wigley hull (FnL=0.35, Fnh=0.857)

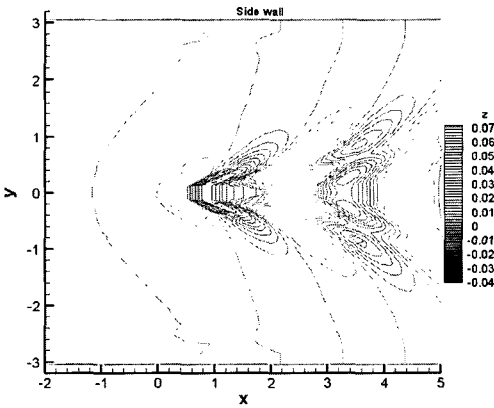


Fig. 5 Wave pattern around Wigley hull (FnL=0.45)

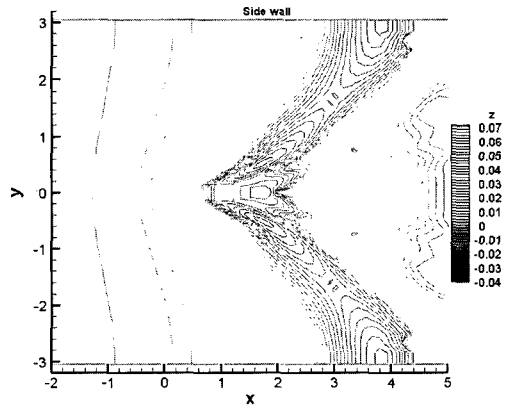


Fig. 8 Wave pattern around Wigley hull (FnL=0.45, Fnh=1.102)

이상에서는 Fnh 가 커짐에 따라 선수 발산파와 배의 진행방향과의 각도가 점점 커지고 있는 것을 볼 수 있다 (Figs. 7, 8 참조). 또한 본 수치계산은 옆 벽면이 존재하여 발산파가 벽면에서 반사되면서 파고가 커지는 현상이 관찰되며 커진 파고는 상대적 수심을 크게 하여 파의 속도도 같이 증가된다. Fnh 가 1.0 에 가까운 경우(Fig. 8)에서 선수 앞쪽에 생성된 파가 관찰되며 이는 앞서 설명된 과정에 의한 것이다. Figs. 6 ~ 8 의 비교 분석 결과 천수역에서 최대파고가 발생하는 영역은 Fnh 가 1 에 가까운 경우(critical speed)이며 이때 저항도 커질 것으로 예상된다. 본 연구에 사용된 수치해석의 검증을 위하여 선속에 따라 계측된 잉여저항계수와 계산된 압력저항계수의 비교를 Fig. 9 에 나타내었다. 잉여저항계수는 Millward and Bevan(1986)의 모형시험에서 정의된 것과 같은 형태를 사용하였고 그 정의는 식(5)에 표시하였다. 낮은 선속에서는 심수역과 천수역의 저항변화가 거의 없는 것을 알 수 있고, Fnh 가 0.7 이상에서는 천수역의 저항이 심수역의 저항보다 크게 나타났다. 또한 Fnh 가 1.2 에서는 심수역과 천수역의 저항성능의 차이가 감소되는 경향을 보이고 있으며 이러한 경향은 모형시험 및 계산결과에서 모두 잘 보여주고 있다. 선속별 심수역 및 천수역의 저항계수 비교를 통하여 본 연구에서 개발된 수치해석법은 수심에 따른 저항성능 변화를 예측할 수 있다는 것을 알 수 있었고 본 수치해석법을 Ro-Pax 선형에 대하여 적용한다.

$$Cr^* = \frac{Rr}{\frac{8}{\pi} \rho g \frac{b^2 d^2}{L}} \quad (5)$$

5. Ro-Pax 선형의 천수역에서 조파저항성능 변화 추정

계산대상인 선박의 설계속도에서 FnL 은 0.309 이고 그 때의 Fnh 는 수심이 배 길이의 13%인 경우 0.876 그리고 26%인 경우 0.606 이다. 모형시험은 심수역에 대하여 SSMB 에서 수행되었으며 수치해석에 의한 압력저항계수와 모형시험의 잉여저항계수의 차이를 보기 위하여 심수역에 대한 수

치계산을 수행하였다. FnL 이 0.222 ~ 0.34 에 대하여 수치해석을 수행하였고 수치해석에 사용된 항주 중 자세는 FnL=0.309 의 모형시험에서 계측된 값으로 고정시켰다. 천수역에서의 계산은 FnL 이 0.222 ~ 0.309 에 대하여 수행하였다. Table 1 은 각각 수심에 대한 Fnh 를 나타내고 있다.

Fig. 10 은 Ro-Pax 선형의 심수역에서 계산된 파형을 보이고 있으며 파고는 모형 scale(모형길이 : 약 8.3m)로 나타내었다. 천수역에서 계산된 파형은 Fig. 11 과 12 에 실었다. Fig. 11 은 h/L 이 0.26 인 경우이고 Fig. 12 는 h/L 이 0.13 인 경우의 파고분포이다. 천수역에서의 특성인 발산파의 각도가 커지는 현상을 볼 수 있으며 특히 Fnh 가 0.867 에서는 발산파의 각도가 80 도 이상으로 나타나며 발생된 파고도 심수역의 것 보다 상당히 커지는 것을 알 수 있으며 그때의 저항성능이 좋지 않을 것으로 예상된다. 또한 연직방향으로 작용하는 압력의 적분을 통하여 연직방향의 힘과 moment 를 추정하였고 그 결과 천수역 특히 수심이 Fnh=0.867 인 경우 항주자세가 심수역의 것과 크게 다를 것으로 판단되며 보다 정확한 저항성능 변화의 예측을 위하여 항주자세 변화도 향후 고려되어야 한다.

Fig. 13 은 심수역과 천수역에서의 선속과 수심 변화에 따른 실험에 의한 잉여저항계수와 계산에 의한 압력저항계수와와의 비교를 보인다. 심수역에 대하여는 계산된 압력 저항계수가 모형시험에서 계측된 잉여저항계수와 정성적으로 잘 일치하고 있으나 저속구간에서 계산치가 계측치 보다 크게 나타나고 있다. 이는 계산에 사용된 항주 자세를 모형시험에서 설계속도로 항주할 때 계측된 것을 사용하였기 때문에 저속구간에서는 실제 모형시험 조건보다 선수 trim 및 sinkage 가 과도하여 발생되었다고 판단된다. FnL=0.222 에서는 천수역에서 압력저항계수는 심수역의 것보다 약간 증가하고

Table 1 Froude number based on water depth (Ro-Pax)

Water depth	FnL=0.222	FnL=0.309
h/L=0.13	0.630	0.876
h/L=0.26	0.436	0.606

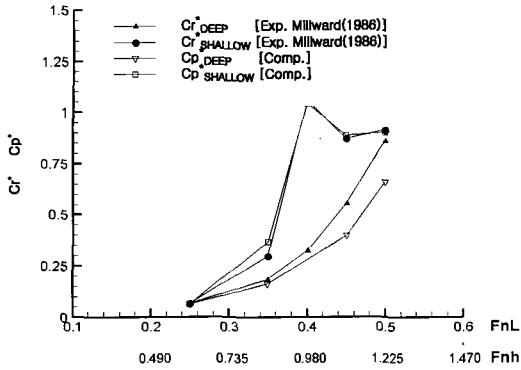


Fig. 9 Comparison of resistance coefficient between experiments and computations

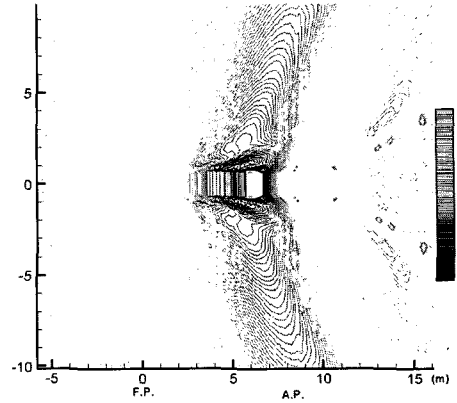


Fig. 12 Wave pattern around Ro-Pax ($F_nL=0.309$, $F_{nh}=0.876$)

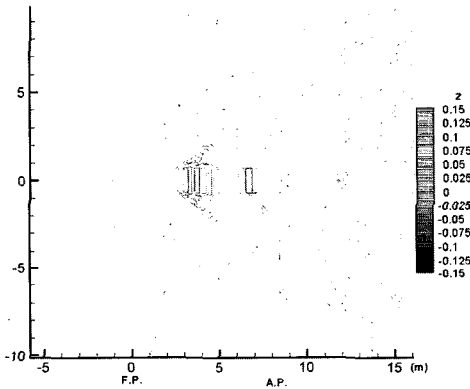


Fig. 10 Wave pattern around Ro-Pax ($F_nL=0.309$)

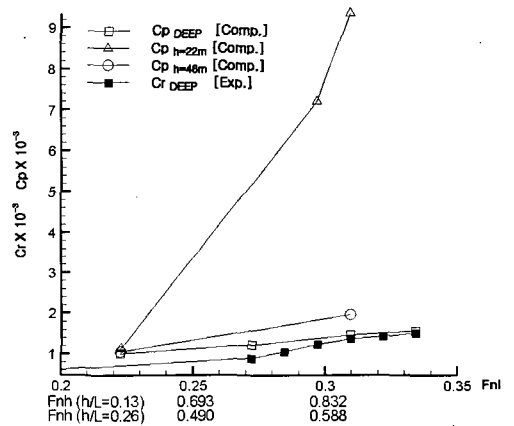


Fig. 13 Comparison of resistance coefficient of Ro-PAX

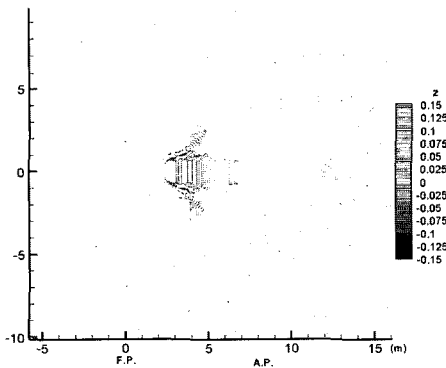


Fig. 11 Wave pattern around Ro-Pax ($F_nL=0.309$, $F_{nh}=0.606$)

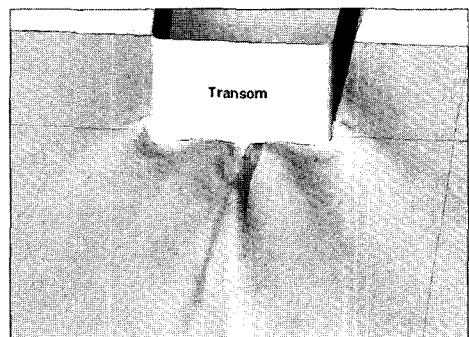


Fig. 14 Perspective view of wave phenomenon around transom ($F_nL=0.309$, deep water)

있으나 $h/L=0.13$ 이고 $Fnh=0.867$ 인 경우에는 압력저항증가가 매우 커지는 것을 계산을 통하여 알 수 있으며 이는 앞 절의 수치해석법의 검증 부분에서 보여준 경향과 일치하고 있다.

Fig. 14 는 계산된 선미 transom 부근의 파형을 보여주고 있다. 선미 Transom 에 대한 특별한 가정 없이도 dry transom 을 잘 모사하고 있다.

6. 결론

선미 transom 부근의 복잡한 파형의 수치적 모사를 위하여 level set method 을 도입하였다. 개발된 수치해석법을 Ro-Pax 선형에 작용하여 심수역과 천수역에서의 저항성능 변화를 추정하였다.

Wigley 선형에 대한 수치해석 및 모형시험 결과의 비교를 통하여 개발된 수치해석법을 검증하였고 계산된 압력저항계수가 모형시험에서 얻은 잉여저항계수와 정성적으로 일치하는 것을 알 수 있었다.

Ro-Pax 주위의 자유수면 유동해석을 통하여 본 수치해석법이 선수미의 복잡한 조파현상 해석에 유용함을 보였고 Fnh 가 0.7 이상에서 급격히 저항이 증가되는 것을 알 수 있었다. 저항추정의 정도향상을 위하여 향후 항주 자세를 고려한 수치해석법 개발이 필요하다

참 고 문 헌

- 박일룡, 반석호, 2003, "RANS 시뮬레이션과 Level-set 기법을 이용한 실선 주위 자유수면 유동해석," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 204~212.
- 박일룡, 김우전, 반석호, 2004, "Twin-skeg 형 콘테이너선 주위의 격자계 생성과 유동해석," 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 1 호, pp. 15~22.
- 최희중, 전호환, 하동대, 2001, "트랜섬 선미를 가지는 선형의 비선형 포텐셜 유동해석," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 195~198.

- Hung, C., 1987, " Extrapolation of Velocity for Inviscid Solid Boundary Condition," AIAA J., Vol. 25, No. 11, pp. 1513~1515.
- Millward A. and Bevan M. G., 1986, "Effect of Shallow Water on a Mathematical Hull at High Subcritical and Supercritical Speeds," Journal of Ship Research, Vol. 30, pp. 85~93.
- Osher, S. and Sethian, J.A., 1988, "Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithm based on Hamilton-Jacobi formulations," J. of Computational. Phys., Vol. 79, pp. 12~49.
- Sussman, M. and Fatemi, E., 1999, "An efficient, interface preserving level set redistancing algorithm and its application to interfacial incompressible fluid flow," SIAM Journal of Scientific Compute, Vol. 20, No. 4, pp. 1165~1191.



< 홍준범 >



< 신수철 >



< 김정중 >



< 최순호 >