대한조선학회논문집 Research Paper
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
eISSN:2287-7355, Vol. 60, No. 2, pp. 76-85, April 2023
https://doi.org/10.3744/SNAK.2023.60.2.76

KCS 선형의 모형시험 및 CFD 해석을 통한 Newman-Sharma 파형저항 추정법의 검토

김명수[1,2] · 김민창[2] · 서정화[2] · 석우찬[3,†]
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소[1]
충남대학교 선박해양공학과[2]
부경대학교 조선해양시스템공학과[3]

Review of Newman-Sharma Wave Pattern Resistance Analysis Using Experimental and Computational Model Tests of KCS

Myoungsoo Kim[1,2] · Minchang Kim[2] · Jeonghwa Seo[2] · Woochan Seok[3,†]
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering[1]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University[2]
Department of Naval Architecture and Marine System Engineering, Pukyong National University[3]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The present study aims to review the wave pattern resistance analysis method suggested by the International Towing Tank Conference. From the experimental database of a container carrier ship model, the wave pattern measurement and resistance test results are utilized. The wave pattern resistance at the design Froude number is obtained to be compared with the wave making resistance of experiments. Wave pattern resistance is lower than wave making resistance by 1978 ITTC and uniform regardless of transverse location of wave cut. The method is also applied to the wave height field by Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses with Froude number variation. Although numerical damping suppressed waves in downstream, waves around the hull and wave pattern resistance are properly predicted.

Keywords : Wave making resistance(조파저항), Model test(모형시험), Kelvin wave(켈빈파형), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

1. 서 론

조파저항은 선박이 일정한 속도로 전진할 때 발생하는 특징적인 수면파인 켈빈파(Kelvin wave)의 생성과 관계된 저항 성분이다. 높은 프루드 수(Froude number, Fr)에서 운항하는 고속선을 제외한 대부분의 선박의 경우 조파저항의 크기는 점성저항보다 작지만, 조파저항은 점성저항에 비해 선형 설계와 운항 속도 조건에 더 민감하게 변하기 때문에 선형 설계의 단계에서 중요하게 다뤄야 한다. 이에 통상적인 예인수조 저항시험은 프루드 수의 상사에 기반한 조파저항의 추정을 위해 수행되며, 선형 설계에서도 조파저항의 최소화를 주요한 목적으로 삼는 등, 조파저항의 이해는 선박 저항추진 분야에서 가장 기초적이면서 중요한 사항이라 할 수 있어 이에 대한 연구가 꾸준히 수행되어왔다 (Choi et al., 2003; Kang et al., 2007; Lee et al., 2009; Seo et al., 2009; Park et al., 2015; Yum et al., 2018).

조파저항의 추정을 위한 모형시험과 관련하여 국제수조회의(International Towing Tank Conference, ITTC)에서는 표준화된 예인수조 저항시험의 수행과 해석법을 제안한 바 있다 (ITTC, 2021a). 이 해석법에서는 무차원화된 조파저항인 조파저항계수와 프루드 수의 관계가 실선과 모형선 간 동일한 것으로 가정한다. 1978 ITTC 성능 추정법이라고 하는 ITTC의 저항/자항시험 해석법은 오랜 시간 동안 세계 각국의 예인수조에서 표준 시험 해석법으로 활용되고 있다 (Min and Kang, 2010; Seo et al., 2021).

ITTC의 저항시험 해석법에서 정의된 조파저항은 수면파를 만드는데 들어가는 에너지를 수면파 정보로부터 직접 구하는게 아니라 모형선의 전체 힘 계측 결과에서 점성 영향을 제거하는 간접적인 방식으로 추정한다. 이와 달리 직접적으로 조파와 관련한

Received : 8 December 2022 | Revised : 20 February 2023 | Accepted : 23 February 2023
† Corresponding author : Woochan Seok, wseok@pknu.ac.kr

저항을 구하기 위한 방안으로 모형선 주위에 생성된 수면파의 파형 분석을 통해 켈빈파가 갖는 에너지를 계산해 파형저항(wave pattern resistance)을 구할 수도 있다. ITTC에는 파형저항의 해석을 위한 실험 가이드라인을 제안한 바 있다 (ITTC, 2021b).

ITTC의 가이드라인 이전에도 파형저항의 계측과 해석에 대한 연구는 꾸준히 수행되어왔다. 대개는 Moran and Landweber (1972)에서 제안된 방식인 종방향 추출법(longitudinal cut method), 즉 예인수조의 벽면에 파고계를 고정하고 모형선이 진행하면서 발생하는 파형을 계측하는 방식이 사용되었다. 종방향 추출법의 상세한 내용은 Kang and Lee (1981)과 Kim (1985)에서 확인할 수 있다. Kang and Kim (1989)의 연구에서는 켈빈파가 진행하면서 에너지를 잃는 쇄파현상에 주목하여 선박 모형에서의 거리를 달리해가며 얻은 파형저항의 계측 결과 추이로부터 쇄파저항 성분을 추출하기도 하였다.

파형저항 해석 시험은 실험의 설계가 복잡하고 일반적인 저항 계측 시험에 비해 계측 데이터의 양이 많으면서도 결과의 정확도를 보장하기가 어려워 실험 불확실성이 저항 계측시험보다 크게 발생한다는 문제가 있다 (Dumez and Cordier, 1997; Lalli et al., 2000). 하지만 파형저항은 전저항 계측을 통한 조파저항 추정 결과를 뒷받침하거나 Kang and Kim (1989)의 연구에서 보인 바와 같이 쇄파저항 분석을 통한 선형 개선 방향을 제시하는 측면에서 유용한 정보로 사용될 수 있다. 이외에도, Kashiwagi (2013)의 연구에서는 파랑 중 부가저항 연구에 파형저항을 도입하는 등, 파형저항 계측 시험의 활용 가능성은 작지 않다고 볼 수 있다.

파형 저항 계산 관련 연구가 제한적인 실험, 계산 자원으로 수행되던 과거에 비해, 최근에는 실험의 기법이나 이를 검증할 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 해석의 수준이 크게 향상되었다. 따라서 파형저항 계측 시험의 유효성을 재평가할 때가 된 것으로 생각되는데, 최근 ITTC에서 파형저항 실험의 가이드라인을 제안한 것도 이런 경향을 반영한 것으로 보인다. 파형저항 해석에 최신 실험 기법의 적용한 사례로, Calisal et al. (2009)는 예인수조 벽에 카메라를 설치하여 광학적 기법을 이용해 항주중인 모형선 주위 파고장(wave elevation field)을 구해 파형저항 추정에 활용하였다. 이와 같이 광학적 계측기법을 적용한다면 기존의 파고계를 이용한 종방향 추출법에 비해 선체에 더 가까운 위치의 파형의 계측이 가능해지기 때문에 파형저항, 쇄파저항의 연구와 저항 감소 관점에서의 선형 개선에 도움이 될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 광학적 기법을 이용한 파형 저항 계측 시험의 설계에 앞서, 기존 파형 저항 해석법의 특성을 파형저항과 조파저항의 관계, 쇄파저항의 해석 관점에서 파악하고자 한다. 우선 공개된 선형의 실험 데이터에 전통적인 종방향 추출법을 통해 파형저항을 구하였고, 이를 파형저항의 해석을 위한 포텐셜 유동과 다른 지배방정식을 적용한 CFD 해석 결과에도 적용하여 실험 불확실성과 1978 ITTC 방법에 적용된 가정의 한계를 배제하여 파형저항 해석법을 검토하였다. 논문은 CFD 해석의 구성, 파형 저항 계산 과정의 이론적 배경, 파형 저항과 조파저항의 비교로 구성되었다.

2. 수치 해석

2.1 해석 대상

해석 대상 선형은 저항성능과 관련한 비교검증용 데이터로 널리 활용되고 있는 3,600 TEU급 컨테이너선인 KRISO Container Ship (KCS)이다 (Kim et al., 2001; Hino et al., 2020). Fig. 1과 Table 1은 각각 해석 대상 선형과 주요 치수이다.

2.2 해석 조건

Table 2에 CFD 해석 조건의 프루드 수($Fr = V/\sqrt{gL_{PP}}$)와 레이놀즈 수(Reynolds number, $Re = VL_{PP}/\nu$)를 나타내었다. Hino et al. (2020)에서는 실선 기준 10 knots에서 26 knots까지의 선속 조건에 대한 저항시험 결과를 CFD 검증 자료로 제공하고 있다. 대상 선형은 Kim et al. (2001)의 연구를 통해 설계속도인 24 knots에 대응되는 Fr = 0.260에서 수면파형을 계측한 결과 또한 공개되어있으므로, 이를 CFD의 파형 결과와 비교하거나 실험 결과를 이용해 직접 파형저항을 구할 수도 있을 것으로 판단하였다.

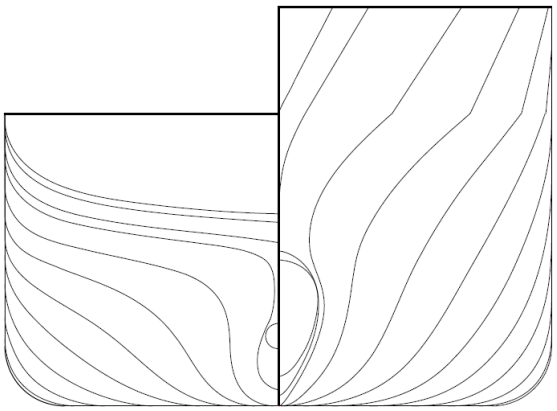

Fig. 1 Lines of KCS

Table 1 Principal particulars of KCS model

Main particulars		Full scale	Model
Scale ratio	λ	-	31.6
Length between perpendiculars	L_{PP} (m)	230	7.2786
Maximum beam of waterline	B_{WL} (m)	32.2	1.0190
Draft	T (m)	10.8	0.3418
Wetted surface area w/o rudder	S_W (m^2)	9424	9.4379
Displacement volume	∇ (m^3)	52030	1.6490
Longitudinal center of buoyancy (%L_{PP}), fwd+	-	-1.48	

Table 2 Test conditions

VS (knots)	VM (m/s)	Fr	Re
10	0.915	0.108	5.23×10^6
14	1.281	0.152	7.33×10^6
18	1.647	0.195	9.42×10^6
21	1.922	0.227	11.0×10^6
24	2.196	0.260	12.6×10^6
26	2.379	0.282	13.6×10^6

본 연구에서는 KCS 선형의 저항시험이 수행된 속도 영역 중 조파저항이 유의미하게 식별될 것으로 기대되는 실선 기준 14 knots에서 26 knots까지의 속도영역에 대한 저항 해석을 수행하였다. 선체 자세는 저항시험 중 계측된 값으로 고정하였다. CFD 해석은 수면이 없는 이중모형(double body)에 대해서도 같은 Re 영역에 대해 수행하여 선체 저항에 대한 수면의 영향을 비교하였다.

2.3 전산유체역학 해석 기법

본 연구에서는 오픈소스 CFD 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하여 저항시험 조건의 KCS 모형 주위의 유동장 해석을 수행하였다. 유동의 운동 해석을 위해 식 (1), (2)와 같이 비압축성 유동의 지배방정식인 연속 방정식과 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였다. 그리고 공기-물의 경계면인 자유수면을 고려하기 위해 VOF(volume of fluid) 기법을 식(3)과 같이 적용하였다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + s \tag{2}$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\bar{u}) = 0 \tag{3}$$

여기서 ρ는 밀도, $\bar{u}$는 속도벡터, p는 정압을 나타낸다. s는 유체에 가해지는 체적력의 소스항을 나타내는데, 여기에는 중력이 포함된다. α는 각 격자에서 물의 체적 비율을 의미하는데, α는 격자가 물로 완전히 채워진 경우 1, 공기만 채워진 경우 0의 값을 갖는다. 본 연구에서는 α=0.5를 자유수면의 위치로 정하였다. τ는 점성응력텐서를 나타내는데, 비압축성 유동에서 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\tau = 2\mu_{eff}S - 2\mu_{eff}(\nabla \cdot \bar{u})I/3 \tag{4}$$

여기서 S는 평균 변형률 텐서, μ_{eff}는 유효 점성계수로 유체 점성계수와 난류 점성계수(μ_t)의 합에 해당한다. 난류 점성 계수를 계산하기 위해 RANS 방정식에 기반한 k-ω SST 난류 모델을 사용하였다. 이는 식 (5)와 같다.

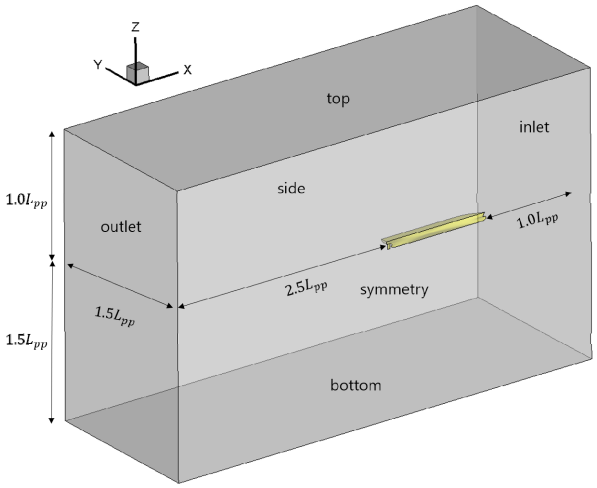

Fig. 2 Schematic diagram of the computational domain

$$\mu_t = \rho\frac{a_1 k}{\max(a_1\omega, SF_2)} \tag{5}$$

여기서 a_1는 상수이고 F_2는 혼성함수이며, 난류 운동에너지(k)와 난류 진동수(ω)는 각각의 수송방정식으로부터 계산하였다 (Yeo et al., 2019).

수치해석을 위한 계산 영역 및 경계 조건은 Fig. 2와 같다. 유동장 해석은 반폭의 공간에 대해 이뤄졌다. 좌표축의 원점은 수선면에서 선체의 길이, 폭방향 중심이며, 선미에서 선수 방향을 +x, 선체 중심에서 좌현 방향을 +y, 중력 가속도의 반대 방향을 +z로 설정하였다.

계산 영역의 크기는 통상적인 저항 해석을 위한 조건을 참고하여 정했다. 선수에서 입구 경계(inlet)까지의 거리는 수선간길이(L_{PP})의 1.0배, 선미에서 출구 경계(outlet)까지의 거리는 L_{PP}의 2.5배, 중심선에서 폭 방향 바깥 경계까지는 L_{PP}의 1.5배로 설정하였다.

경계면 중 입구 경계에서의 속도 및 압력 경계조건은 각각 Dirichlet과 Neumann 경계조건을 적용하였으며, 출구 경계에서의 속도 및 압력 경계조건은 각각 Neumann과 Dirichlet 경계조건을 사용하였다. 그리고 선체 표면의 속도 경계조건은 속도값은 0으로 고정된 Dirichlet 경계조건, 압력은 Neumann 경계조건을 적용하였다. 모형에서 멀리 떨어진 상부 경계(top), 하부 경계(bottom), 측면 경계(side)는 Dirichlet 경계조건을 적용하였다. 선체 중심선을 따라 놓인 대칭 중심면(symmetry)에서의 속도 및 압력 경계조건은 대칭 경계조건을 사용하였다. 그리고 자유수면이 없는 이중모형의 해석에서는 수면 위치에 경계면을 설정하고, 대칭 경계조건을 적용하였다,

곡률이 심한 벽면에서 격자 간격을 일정하게 유지하기 위해 선체 주변에서는 5개의 프리즘 층을 생성하였으며, 벽함수를 사용하기 위해 첫 번째 격자점은 $30 \leq y+ \leq 40$을 기준으로 위치하였다. 자유수면의 영향을 정확히 고려하기 위해 자유수면 근처에 격자를 밀집시켰으며, 선박으로부터 멀어질수록 격자의 밀집도를 감소시켰다. 본 연구에서 사용된 격자 수는 1,183,658개이다.

시간과 공간 차분은 2차 정확도의 Crank-Nicolson 기법과 중앙 차분법을 각각 적용하였다. 수치 안정성을 위해 속도, 압력, 난류성분들에 대해 OpenFOAM에서 제공하는 linear-upwind 제한자(linearUpwind limiter)를 반영하였다. 또한, VOF 지배방정식의 이송항은 안정된 자유수면 유동 결과를 얻을 수 있는 total variation diminishing 특성을 지닌 VanLeer 제한자를 사용하였다. 계산 시간 간격에 따른 수치 안정성을 위해 Courant 수가 1보다 작도록 계산 시간 간격을 설정하였으며, 압력과 속도의 연성을 계산을 위해 PIMPLE(Merged PISO-SIMPLE) 알고리즘을 사용하였다.

3. 파형저항 추정 이론

이 장에서는 전통적인 파형저항 해석법의 기본 이론을 먼저 설명하고, 직선 영역의 파형 추출 결과에서 파형저항을 구하는 Newman-Sharma 기법의 주요한 수식을 보였다. 파형저항 해석에서 기본 좌표계는 Fig. 3과 같이 좌표계의 원점(o)이 배의 수선면 중앙에 위치한 물체고정 오른손 직교좌표계(o-xyz)를 적용한다. Fig. 2의 CFD 해석 조건과 같이 x는 선체의 직진 방향, y는 좌현, z는 상방으로 정의된다.

파형저항 추정 이론은 잘 알려진 포텐셜 유동(potential flow)을 이용한 조파저항 계산에 기반한다. 포텐셜 유동 관점에서는 조파저항(R_W)과 파형저항(R_{WP})을 동일하게 취급할 수 있으나, 선체에 가해지는 힘의 관점에서 설명할 때는 R_W을, 수면파에서 저항을 추정하는 관점에서는 R_{WP}을 이용해 식을 표시하였다. 그리고 4장에서 R_W은 포텐셜 유동 해석 외의 모형시험, CFD 해석 등을 통해 선체에 가해지는 힘으로부터 직접 구한 조파저항으로 한정하여 표시하였다.

Fig. 3의 그림에서 선박 주위의 좌표 $\mathbf{x}$ = (x, y, z)에 대응되는 속도포텐셜 $\phi(\mathbf{x})$는 선박의 전진속도로 인한 속도포텐셜($-V_M x$)과 선체로 인한 교란성분($\phi'(\mathbf{x})$)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\phi(\boldsymbol{x}) = -V_M x + \phi'(\boldsymbol{x}) \tag{6}$$

Havelock (1932)은 선체와 같은 속도로 이동하는 좌표계에서 속도 포텐셜에 비례한 점성항($\mu'\phi$)이 포함된 에너지 보존식으로 식 (7)을 제안하였다. 좌표계가 선체와 함께 V_M의 속도로 이동하는 정상 상태 문제에서 시간에 대한 편미분 항($\partial\phi'/\partial t$)이 $-V_M\partial\phi'/\partial x$로 대체되었음에 유의한다.

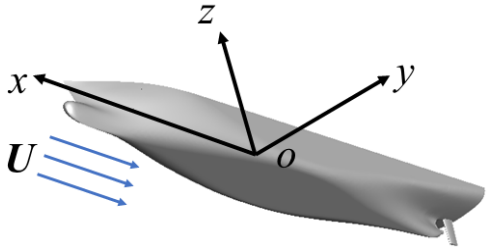

Fig. 3 Coordinate system

$$-V_M\frac{\partial\phi'}{\partial x} - g\zeta + \mu'\phi' = constant \tag{7}$$

여기서 ζ(x,y)는 점(x,y) 위치의 수면파의 z방향 위치로, 정수 중 ζ는 0이므로 파형에는 교란 성분만이 존재하는 것으로 보아 단순히 ζ으로 나타냈다. g는 중력가속도이다. 식 (7)을 x에 대해 편미분을 취한 뒤, 수표면의 선형화된 운동학적 경계조건인 식 (8)을 대입하면 수표면에서의 운동방정식인 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$-V_M\frac{\partial\zeta}{\partial x} = \frac{\partial\phi'}{\partial z} \tag{8}$$

$$\frac{\partial^2\phi'}{\partial x^2} + k_0\frac{\partial\phi'}{\partial z} - \mu\frac{\partial\phi'}{\partial x} = 0,\ z = 0 \tag{9}$$

여기서 $k_0 = g/V_M^2$, $\mu = \mu'/V_M$로 정의한다. Havelock (1932)의 연구에서 μ'는 속도에 비례하는 것으로 가정된 마찰 성분으로, 점성유체의 동점성계수와는 다른 물리량임을 일러둔다. 조파저항을 계산하는 과정에서 점성계수가 0일 때의 극한값을 구하기 때문에 μ의 물리적 의미에 대해서는 특별히 고려할 필요는 없다.

포텐셜 유동의 지배방정식인 라플라스 식(Laplace equation, $\nabla^2\phi = 0$)과 식 (9)를 만족하는 속도 포텐셜을 구한다. 단위면적당 소스(Source) 세기 σ를 선체 표면 S 상의 점 $\mathbf{s}$ = (s_x, s_y, s_z)에 분포시키고, 그 거울상(s_x, s_y, $-s_z$)에는 같은 크기의 싱크(Sink)를 분포시킨다. 이들을 선체 표면에 걸쳐 적분하면 선체로 인한 유동 교란의 포텐셜을 식 (10)과 같이 구할 수 있다 (Havolock,1932).

$$\phi'(\boldsymbol{x}) = \int_S \sigma\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)ds - \frac{k_0}{\pi}\int_S \sigma\int_{-\pi}^{\pi}\sec^2\theta \times \int_0^{\infty}\frac{\exp\left[-k(s_z - z) + ik\tilde{\omega}\right]}{k - k_0\sec^2\theta + i\mu\sec\theta}dkd\theta ds \tag{10}$$

식 (10)의 r_1, r_2, $\tilde{w}$는 다음과 같이 나타낼 수 있다. θ는 x축과 (x, y) 점이 이루는 각도이다.

$$r_1 = \sqrt{(x - s_x)^2 + (y - s_y)^2 + (z + s_z)^2} \tag{11}$$

$$r_2 = \sqrt{(x - s_x)^2 + (y - s_y)^2 + (z - s_z)^2} \tag{12}$$

$$\tilde{\omega} = (x - s_x)\cos\theta + (y - s_y)\sin\theta \tag{13}$$

Havelock (1932)은 정속 항주 중인 정상상태에서 파의 에너지 소산률(rate of dissipation of energy)은 조파저항을 통해 유체영역에 공급되는 일률($R_W V_M$)과 평형을 이룬다고 보았다. 식 (7)에서 구할 수 있는 단위 부피당 점성 관련 에너지 발생 $\rho\mu'\phi'$을 통한 에너지 소산률은 수면과 선체 표면을 통한 유체 경계 전체에 걸쳐 발생하는 에너지 소산율의 적분으로 보아, 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_W V_M = \mu' \rho \int \phi' \frac{\partial \phi'}{\partial n} dA \tag{14}$$

선체 표면은 경계 조건상 수직 방향 속도가 없으므로 식(14)의 우변에서 유체의 경계 영역 중 수면만을 유효한 적분 구간으로 볼 수 있다. 따라서 경계면의 수직방향 n은 수면에 수직인 방향인 z로 바꾸고, A는 z = 0인 xy평면으로 대체한 다음, 점성계수가 0에 가까워질 때의 극한값을 구해 조파저항을 구한다. 그 결과는 식 (15)와 같다.

$$R_W = \lim_{\mu \to 0} [\mu \rho \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi \frac{\partial \phi}{\partial z} dx dy] \tag{15}$$

식 (6)의 첫 번째 항은 z방향 편미분에 대해 0이므로, $\partial \phi' / \partial z = \partial \phi / \partial z$가 된다. 그리고 식 (11)에 의하여, z = 0이면 $r_1 = r_2$가 되고, 식 (10)의 첫 번째 적분항이 소거된다. 식 (10)에 종방향 파수 $k = k_0 \sec^2\theta$를 대입하고 z에 대한 편미분을 구하면 식 (16)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \phi'}{\partial z} = -\frac{1}{\pi} \int_S \sigma \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} \frac{k^2 \exp[-k s_z + ik\widetilde{w}]}{k - k_0 \sec^2\theta + i\mu sec\theta} dk d\theta ds \tag{16}$$

Newman-Sharma 기법에서는 식 (10)과 (16)을 간단하게 나타내기 위해 식 (17)의 진폭함수를 도입하고, 계측된 (x, y, ζ) 세트로부터 진폭함수를 구한다. 진폭함수를 이용하면 식 (18)과 같이 속도포텐셜을 나타낼 수 있다.

$$P(\theta) + iQ(\theta) = \int_S \sigma \exp[k_0 z \sec^2\theta + i(x\cos\theta + y\sin\theta)] ds \tag{17}$$

$$\phi = -\frac{k_0}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} P(\theta) \cos(k_0 \widetilde{w}_0 \sec^2\theta) + Q(\theta) \sin(k_0 \widetilde{w}_0 \sec^2\theta) \sec^2\theta \exp(k_0 z \sec^2\theta) d\theta \tag{18}$$

여기서 $\widetilde{\omega}_0$는 s_x, s_y가 0일 때의 $\widetilde{\omega}$이다.

식 (15)와 식 (18)을 이용하여 조파저항을 구할 수 있고, 이는 수면파형으로부터 구하는 값이므로 파형저항으로 볼 수 있다. 그 결과는 식 (19)와 같다.

$$R_{WP} = 8\pi k_0^2 \rho \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [P^2(\theta) + Q^2(\theta)] \sec^3\theta d\theta \tag{19}$$

식 (7)에서 점성항을 빼면 속도포텐셜과 파형의 관계식인 식 (20)을 구할 수 있다.

$$\zeta(x,y) = -\frac{U}{g} \frac{\partial \phi}{\partial x}|_{z=0} = \frac{-U}{4\pi g} \iint_S \sigma(\boldsymbol{s}) \frac{\partial \phi}{\partial x} ds \tag{20}$$

식 (18)의 속도포텐셜을 식 (20)에 대입하면 식 (21)과 같이 진폭함수를 이용해 파형을 나타낼 수 있다.

$$\zeta(x,y) = \frac{k_0}{\pi V_M} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} P(\theta) \cos(k_0 \widetilde{w}_0 \sec^2\theta) + Q(\theta) \sin(k_0 \widetilde{w}_0 \sec^2\theta) \sec^3\theta d\theta \tag{21}$$

Kang and Kim (1989)에서는 기존의 Newman-Sharma 기법에 더하여, 파형 계측결과를 푸리에 변환하고 $k_0 y$가 충분히 크다고 가정하여 진폭함수와 파형의 관계를 근사하는 식을 식 (22)와 같이 구하였다. 따라서 파형 ζ에서 식 (22)를 이용해 진폭함수를 구하고, 식 (19)를 이용해 파형저항을 계산할 수 있다.

$$P(\theta) + iQ(\theta) = V_M \cos\theta \sin\theta \exp[ik_0 y \tan\theta \sec\theta) \times \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x,y) \exp[ik_0 x sec\theta] dx \tag{22}$$

4. 결과 및 고찰

4.1 설계 속도의 파형저항 해석

실험 결과로부터 설계 속도인 Fr = 0.26의 파형저항을 구하고, 이를 CFD의 결과와 비교하였다. 실험, CFD의 조파저항과 파형저항의 비교를 통해 파형저항 해석법의 특성을 파악하고 CFD 해석으로 파형저항의 수식을 검증할 수 있는지를 고찰하였다.

Table 3 Comparison of resistance coefficients

	Experiment				CFD (double body)	CFD (free surface)	
Fr	$C_T \times 10^3$	$C_F \times 10^3$ (1957 ITTC)	*k*	$C_W \times 10^3$ (1978 ITTC)	$C_T \times 103$	$C_T \times 10^3$ (difference to experiment)	$C_W \times 10^3$
0.152	3.641	3.169	0.133	0.0525	3.452	3.560 (−2.2%)	0.108
0.195	3.475	3.031		0.0410	3.269	3.401 (−2.1%)	0.131
0.227	3.467	2.951		0.124	3.182	3.385 (−2.4%)	0.202
0.260	3.711	2.883		0.445	3.141	3.712 (0.0%)	0.571
0.282	4.501	2.846		1.277	3.118	4.556 (1.2%)	1.438

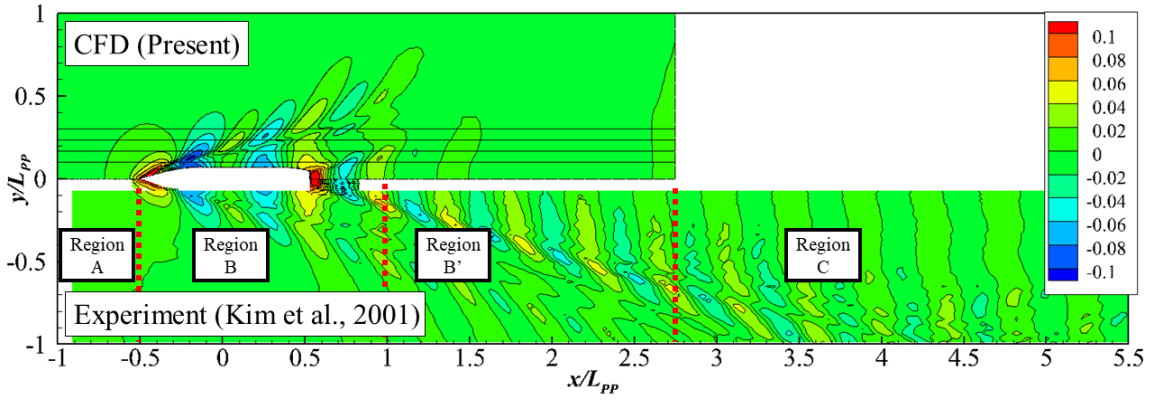

Fig. 4 Wave elevation field of experiment and CFD analysis

Table 3은 CFD를 통한 전저항, 조파저항 해석과 Hino et al. (2020)의 저항 시험 결과의 비교이다. 전체적으로 CFD를 통해 얻은 전저항계수(C_T)는 실험 대비 2% 내외의 차이를 보였기 때문에, CFD 해석의 세팅은 적절히 이뤄진 것으로 판단하였다.

Fig. 4는 실험과 CFD 해석의 전체 파형 비교이다. 파고는 k_0z로 무차원화 되었다. 실험에서는 파형이 먼 하류까지 유지되는데 반해, CFD 해석에서는 선체에서 멀어질수록 급격히 파형의 크기가 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 문제는 점성을 고려하지 않은 포텐셜 유동 해석의 조파저항 분석에서도 보고된 바 있으나 (Kim et al., 2000), 그 정도는 본 연구의 유한체적법 해석에 비하면 작은 편이므로 수치감쇠와 난류모델의 영향이 함께 작용하는 것으로 보인다. 뒤에서는 이런 CFD 해석 특성의 영향을 정량적으로 분석하였다.

ITTC에서는 파형의 추출 위치가 L_{PP}의 21%에서 167% 사이에서 정하도록 한다. 이는 선속에 따른 켈빈파형의 파장 변화를 고려하지 않은 결과이므로, 저속에서는 선체 주위에서만 짧은 파장으로 발달되는 켈빈파형을 추출하기가 어렵다는 문제가 있다. 본 연구에서는 Table 4에 보인대로 설계속도에서 y/L_{PP} 위치를 선정하고, 이에 대응하는 k_0y값 기준으로 종방향 추출 위치를 선정하였다. k_0y의 형식으로 무차원화된 파형 추출 위치는 선속 조건이 반영되었으므로 낮은 선속에서는 선체에 더 가까운 위치의 파형을 추출하게 된다.

Table 4에 파형 추출 위치를 정리하여 나타내었다. k_0y는 선체 중앙선으로부터의 거리이기 때문에 모형선의 반폭인 y/L_{PP} = 0.07보다 안쪽에 대해서는 수면파형을 얻을 수 없다. Table 4에서 굵은 글씨로 표시한 구역이 파형 추출이 가능한 영역이다.

ITTC 파형저항 해석법에서는 실험을 통해 계측한 수면파 영역을 3가지로 구분한다. 이를 Fig. 4의 실험 결과 부분에 표시하였다. A 영역은 선체의 영향을 받지 않은 정수면으로, 본 연구에서는 x/L_{PP} = −0.5인 FP 위치로 정하였다. B영역은 실제 파형 계측이 이뤄지는 영역으로, 파형저항 해석에서 가장 중요한 영역이다.

Fig. 5의 실험, CFD 해석의 파형 비교에서 x/L_{PP} = 1.0까지는 서로의 파형이 일치하는 것으로 보았다. 그 이후로는 CFD 해석의 파형이 감쇠하여 비교할 수가 없게 되어, 이를 B'영역으로 따로 정의하였다. C 영역은 켈빈 파형이 수조 벽면을 맞고 반사되는 영역으로, 파고 계측 결과가 간섭을 받으므로 ITTC에서는 C 영역의 데이터는 잘라내고(truncation) 식(28)의 계수(c_1, c_2, c_3)를 잘 조정하여 B 영역의 파형을 잘 추종하는 단일 파장의 파형을 추정하여 덧붙이도록 하고 있다 (ITTC, 2021b).

$$\zeta(x,y_C)=\frac{c_1\cos k_0x-c_2\sin k_0x}{\sqrt{c_3+k_0x}} \tag{28}$$

CFD에서는 수조 벽면을 구현하지 않을뿐더러 Fig. 5에서 보인 바와 같이 생성된 켈빈파가 이미 B'영역에서 감쇠하고 있어 C 영역의 파형을 식별할 수는 없었다. 따라서 trunctaion 개념을 적용해 B'영역과 C영역의 파고를 외삽하여 얻을 수는 없었다.

실험에서 조파저항계수(C_W)는 전저항계수(C_T)에서 점성저항성분($(1+k)C_F$)을 뺀 값으로 정의된다. 형상계수(k)는 ITTC 가이드라인을 따라 0.1 < Fr < 0.2 영역에 대해서 Fr^4과 전저항 계수의 회귀분석을 통해 구하였다 (ITTC, 2021a). 이렇게 구한 조파

Table 4 Longitudinal wave cut location (y/L_{PP})

Fr	k_0y									
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0.152	–	–	–	–	–	–	0.081	0.092	0.104	0.115
0.195	–	–	–	0.076	0.095	0.114	0.133	0.152	0.171	0.190
0.227	–	–	0.078	0.104	0.130	0.155	0.181	0.207	0.233	0.259
0.260	–	–	0.101	0.135	0.169	0.203	0.237	0.271	0.304	0.338
0.282	–	0.079	0.119	0.159	0.198	0.238	0.278	0.317	0.357	0.397

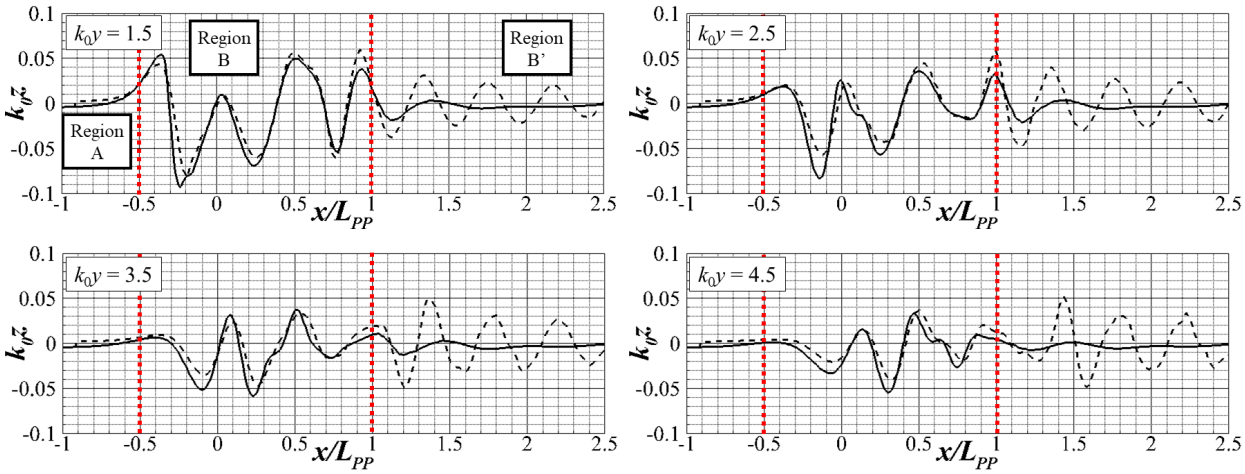

Fig. 5 Comparison of longitudinal wave cuts of CFD analysis (solid lines) and experiments (dotted lines) at *Fr* = 0.26

저항계수를 실험의 파형저항계수(C_{WP})과 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 파형저항계수는 B(실선), B'(점선), C(파선) 영역에 대한 성분을 구분하여 나타내었고, k_0y = 0의 파형저항을 외삽하여 표시하였다.

Fig. 6에서 B+B' 영역의 파형저항은 k_0y가 증가함에도 별 차이를 보이지 않았으므로, 쇄파저항의 영향은 무시할만한 것으로 보인다. B 영역의 파형저항은 선체에 가까워질수록 증가하는 경향이 나왔는데, 이는 선체 주위에서 켈빈파형의 파고가 높게 형성되는 것을 감안하면 타당한 것으로 판단된다. 특이하게도 B와 B+B'의 파형저항 추이를 각각 외삽하여 구한 k_0y = 0에서의 파형저항은 비슷한 값으로 추정되었다. 이는 B영역의 파형저항 해석만으로도 k_0y = 0의 파형저항을 유효하게 추정할 수 있음을 의미한다.

Fig. 5에서 보인 바와 같이, CFD와 실험 모두 B 영역에서는 파형이 유사하였다. 따라서 B 영역의 파형저항은 실험과 CFD에서 비슷한 경향을 보였다. 다만 B'영역은 CFD에서 해석하지 못하였으므로 본 연구에서 사용된 CFD 해석 기법만을 이용해 B+B'영역의 파형저항을 추정할 수는 없었고, CFD 결과의 B 영역 파형저항을 k_0y = 0에서 외삽하고 이를 통해 B+B'영역의 파형저항을 역으로 구하는 접근법은 CFD 해석에서도 유효해 보인다.

C 영역의 파형저항은 특이하게 k_0y가 증가할수록 그 크기가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 특성은 선미파에서 발달하는 발산파가 B'과 C 영역의 경계에 가까워짐에 따른 해석의 오차로 보인다. Fig. 4의 파형 결과에서 알 수 있듯, 종방향 파형의 횡방향 추출 위치가 선체에서 멀어질수록 선미 발산파가 B'과 C 영역의 경계에 가깝게 위치하게 된다. 따라서 Fig. 7의 k_0y = 1.5와 4.5의 파형 비교에서 보이듯 C 영역의 외삽된 파고의 진폭(c_1, c_2)은 k_0y가 증가할수록 크게 나타난다. 만약 실험이 수행된 예인수조의 폭이 더 컸다면 C 영역의 경계가 더 하류로 이동하여 이러한 문제는 발생하지 않았을 것으로 생각된다.

실험에서 B+B'영역의 파형저항 추이로부터 k_0y = 0에서 외삽해 추정한 파형저항의 값은 0.249로, 1978 ITTC 방법으로 구한 모형시험의 조파저항에 비하면 55% 정도의 크기를 가졌다. 이는 파형저항 해석식에서는 다루지 않는 비선형성이나 다른 물리현상이 실제 조파현상에 영향을 미침으로 이해할 수 있다. 이런 경향은 일반적인 선형을 이용한 파형저항 연구에서도 지적된 사항이다 (Moran and Landweber, 1972; Kang and Lee, 1981; Kang and Kim, 1989).

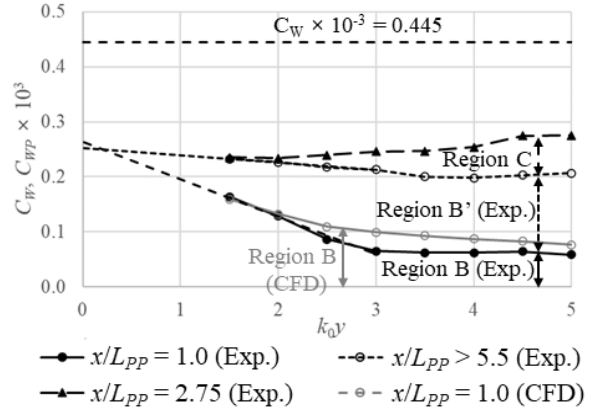

Fig. 6 Comparison of C_W and C_{WP} of the experimental and CFD results at *Fr* = 0.26

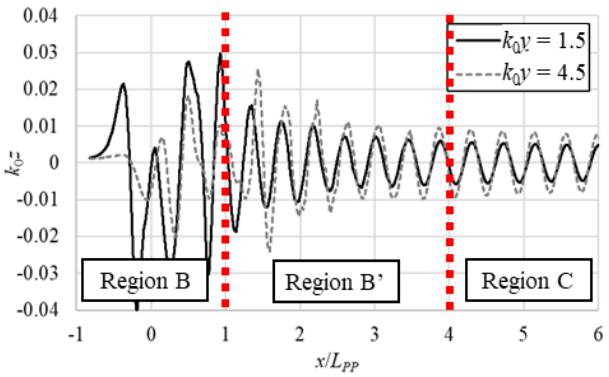

Fig. 7 Comparison of the longitudinal wave pattern at k_0y = 1.5 and 4.5

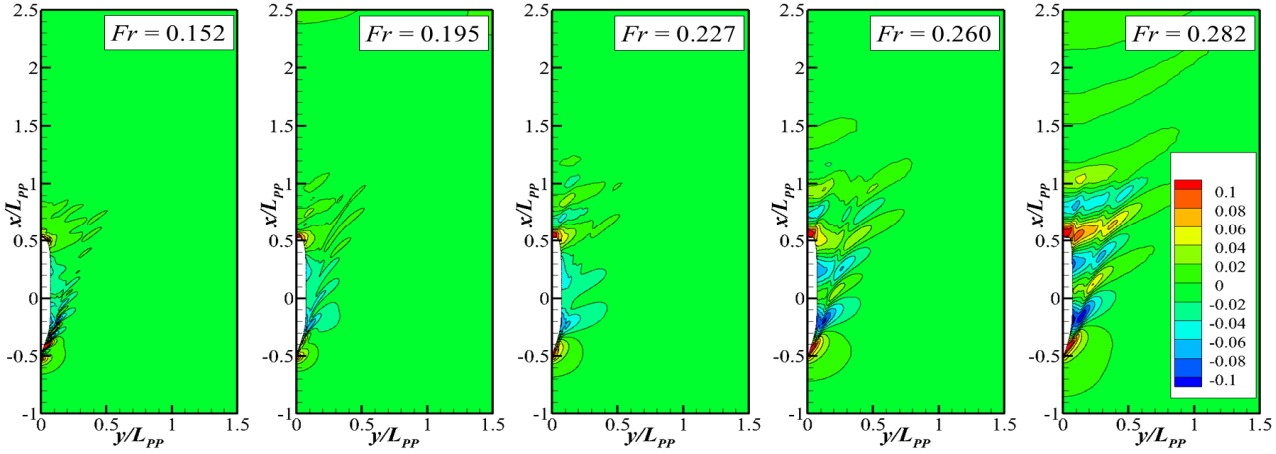

Fig. 8 Wave elevation (k_0z) around the model with Fr variation of CFD analyses

4.2 선속 별 파형저항 해석

4.2장에서는 CFD 해석에서의 파형저항 해석 결과를 Fr 변화와 함께 설명하였다. 4.1장에서 확인한대로 B', C 영역의 파형저항을 CFD를 통해서는 구할 수 없었기 때문에 B영역의 파형저항 결과로부터 k_0y = 0에서 추정된 파형저항을 Fr 변화와 연관하여 설명하였다.

CFD 해석에서 조파저항으로 볼 수 있는 저항 성분은 실험과 같이 1978 ITTC 방법으로 구한 조파저항계수 외에도 수면을 포함한 모형의 전저항과 수면이 없는 이중모형의 저항 차이로도 구할 수 있다. 선체 표면의 법선방향 압력의 적분값은 점성압력 저항 성분을 포함하므로 엄밀한 의미의 조파저항은 아니나, CFD 해석에서 바로 구할 수 있는 저항성분이므로 비교에 포함하였다.

본 연구에서는 조파저항이 수면과 관련한 모든 물리현상으로 인한 것으로 여겨 이중모형과 이상유동 조건의 전저항 차이를 CFD의 조파저항으로 정의하여 Table 3의 오른쪽 열에 나타냈고, CFD의 파형저항도 이 값과 비교하였다. 이렇게 구한 CFD의 조파저항계수는 실험의 1978 ITTC 방법을 통해 구한 조파저항계수보다 큰 값을 보였다.

CFD 해석 결과의 파형을 Fig. 8에 나타내었다. 앞서 설계속도의 파형 비교와 같이, 켈빈파형은 선체 근처에만 한정하여 나타나고 후류로 전파되는 양상은 거의 나타나지 않아서 파형은 B 영역에 한정하여 식별할 수 있었다. 모든 선속의 CFD 해석 결과에서 Table 4의 추출 위치별 파형저항을 구해 Table 3의 가장 오른쪽 열의 CFD를 통해 구한 C_W와 비교해 Flg. 9에 나타냈다.

낮은 Fr일수록 파형은 선형파에 가까워져 파형저항의 해석 정확도가 향상될 것으로 예상하였으나, Fr = 0.152, 0.195 조건에서는 파형저항에 대해 유의미한 결과를 확인할 수 없었다. 이는 격자 해상도의 한계로 낮은 Fr의 작은 수면파형을 정밀하게 얻어내지 못한 탓으로 판단된다. 그보다 높은 선속에서는 C_W와 C_{WP}의 비율은 실험의 55%와 비슷한 수준으로 나타났기 때문에 선형 수면파 가정에 근거한 파형저항 해석은 실험에서와 마찬가지로 CFD에서도 조파저항과 차이가 있음을 확인하였다.

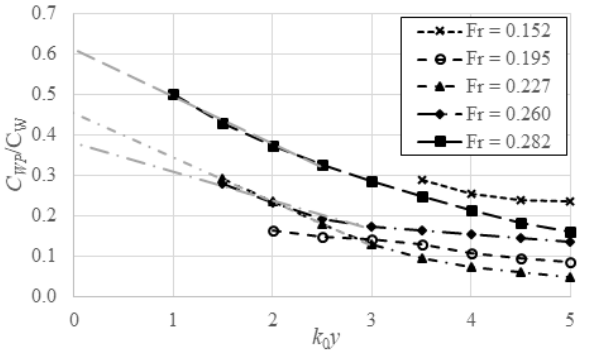

Fig. 9 Comparison of C_{WP}/C_W of CFD results

5. 결 론

수면파의 파고 분포로부터 파형저항을 구하는 기법 중 대표적인 Newman-Sharma 종방향 추출법을 KCS 선형의 실험 및 CFD 해석 결과에 적용하였다. 이를 통해 다음의 결론을 얻었다.

실험 결과에서 파형저항은 1978 ITTC 기법을 통해 구한 조파저항의 55%정도였다. ITTC에서 제안한 Truncation을 통한 파형저항 추정은 오히려 비물리적인 경향을 보였는데, k_0y가 증가함에 따라 선미 발산파가 외삽 영역에 반영되어 파형저항을 과도하게 추정하는 경향이 나타났기 때문이다. 이를 고려하지 않은 파형저항 해석이 더 일관된 결과를 보였다.

CFD 해석에서는 수치감쇠의 영향이 강해 실험보다 후류 영역의 파형이 작게 나타났다. 이로 인해 파형저항을 전 영역에 대해 구할 수는 없었다. 하지만 선체 주위의 파형저항 추이로부터 전체 파형저항을 추정할 수 있음을 실험에서 확인하였기 때문에 같은 방식으로 파형저항을 구하였다. 낮은 선속 조건에서는 이러한 추정이 잘 맞지 않았고, 설계속도영역과 그 이상 조건에 한해서만 조파저항과의 비교가 가능했지만 조파저항에 근사한 수준의 파형저항이 나타나지 않음은 모형시험 결과의 해석과 동일했다.

본 연구에서는 종방향 추출법에 근거한 파형저항 해석을 수행했으며, 해석법은 계산의 용이함을 위해 많은 부분이 간소화되어 파형저항의 정확한 해석에 한계가 있음을 알 수 있었다. 최근 모

형선 주위 파형 계측에 대한 실험 기법이 새로 제안되고 있으므로 이런 실험 기법을 감안한 파형 추출 방식이나 비선형성을 고려한 해석식의 개발이 필요할 것으로 생각된다. 이를 통해 수면파 발생에 대한 해석이 필요한 모형시험, 즉 사항 중의 수면파 발생이나 파랑 중 부가저항 등의 연구에도 파형저항 계산법을 적용해 선박 유체역학 문제의 해결에 도움이 될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었습니다.

References

Calisal, S.M., Sireli, M.E. and Tan, J., 2009. A direct measurement of wave resistance by the measurement of wave height on a surface patch. *Journal of Ship Research,* 53(3), pp.170-177.

Choi, H.-J., Seo, K.-C., Kim, B.-E. and Chun, H.-H., 2003. Development of an optimum hull form for a container ship with minimum wave resistance. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea,* 40(4), pp.8-15.

Dumez, F.-X. and Cordier, S., 1997. Accuracy of wave pattern analysis methods in towing tanks. *21st Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim,* Norway, 24-28 June 1996.

Havelock, T.H., 1932. The Theory of Wave Resistance. In: Royal Society, *Proceedings of the Royal Society of London*. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, Nov. 1, 1932, Vol. 138, No. 835 pp. 339-348

Hino, T., Stern, F., Larsson, L., Visonneau, M., Hirata, N. and Kim, J., 2020. *Numerical Ship Hydrodynamics: An Assessment of the Tokyo 2015 Workshop.* Springer Nature, Cham, Switzerland.

International Towing Tank Conference, 2021a. *Resistance Tests.* ITTC-Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-02-01.

International Towing Tank Conference, 2021b. *Wave Profile Measurement and Wave Pattern Resistance Analysis.* ITTC-Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-02-04.

Kang, K.J. and Kim, E.C., 1989. A Study on the improvement of fore-body shape considering breaking wave phenomena. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea,* 26(2), pp.1-12.

Kang, S.H. and Lee, Y.G., 1981. Study on the wave-pattern analysis by longitudinal cut method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea,* 18(1), pp.9-18.

Kang, D.-S., Yu, J.-W. and Lee, Y.-G., 2007. A study on the hull form design with minimum resistance for domestic coastal fishing boats. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea,* 44(4), pp.349-359.

Kashiwagi, M., 2013. Hydrodynamic study on added resistance using unsteady wave analysis. *Journal of Ship Research,* 57(4), pp.220-240.

Kim, D.-H., Kim, W.-J. and Van, S.-H., 2000. Analysis of the nonlinear wave-making problem of practical hull forms using panel method, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 37(4), pp.1-10.

Kim, W.J., 1985. Wave-making Resistance of a Parabolic Hull. Master's Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.

Kim, W.J., Van, S.H. and Kim, D.H., 2001. Measurement of flows around modern commercial ship models. Experiments in Fluids, 31, pp.567-578.

Lalli, F., Di Felice, F., Esposito, P.G., Moriconi, A. and Piscopia, R., 2000. Longitudinal cut method revisited: a survey on main error sources. *Journal of Ship Research,* 44(2), pp. 120-139.

Lee, Y.-S. and Choi, Y.-B., 2009. Hull form optimization based on from parameter design. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea,* 46(6), pp.562-568.

Min, K.-S. and Kang, S.-H., 2010. Study on the form factor and hull-scale ship resistance prediction method. *Journal of Marine Science and Technology,* 15(2), pp.108-118.

Moran, D.D. and Landweber, L., 1972, A longitudinal-cut method for determining wavemaking resistance. *Journal of Ship Reserach,* 16(1), pp.21-40.

Park, J.H., Choi, J.-E. and Chun, H.-H., 2015. Hull-form optimization of KSUEZMAX to enhance resistance performance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering,* 7(1), pp.100-114.

Seo, K.-C., Atlar, M., Kim, H.-J. and Chun, H.-H., 2009. Minimization of wave-making resistance for "inclined keel' containership. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea,* 46(2), pp.97-104.

Seo, J., Park, J., Go, S.C., Rhee, S.H. and Yoo, J., 2021. Application of Monte Carlo simulations to uncertainty assessment of ship poweirng prediction by the 1978 ITTC method. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering,* 13, pp.292-305.

Yum, J.-G., Kang, K.-J., Lee, Y.-Y., Lee, C.-J. and Ok, K.-

D., 2018. A study on the basic design for platform support vessel (PSV) and hull form development for enhance-ment of resistance & propulsion performance. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(3), pp.196-204.

Yeo, H., Seok, W., Shin, S., Huh, Y. C., Jung, B. C., Myung, C. S. and Rhee, S. H. (2019). Computational analysis of the performance of a vertical axis turbine in a water pipe. *Energies,* 12(20), 3998.

김 명 수 | 김 민 창 | 서 정 화 | 석 우 찬