

# 단파장 영역에서의 부가저항 해석

양경규·서민국·김용환<sup>†</sup>  
서울대학교 조선해양공학과

## Analysis of Added Resistance in Short Waves

Kyung-Kyu Yang · Min-Guk Seo · Yonghwan Kim<sup>†</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

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.

In this study, the added resistance of ships in short waves is systematically studied by using two different numerical methods – Rankine panel method and Cartesian grid method – and existing asymptotic and empirical formulae. Analysis of added resistance in short waves has been preconceived as a shortcoming of numerical computation. This study aims to observe such preconception by comparing the computational results, particularly based on two representative three-dimensional methods, and with the existing formulae and experimental data. In the Rankine panel method, a near-field method based on direct pressure integration is adopted. In the Cartesian grid method, the wave-body interaction problem is considered as a multiphase problem, and volume fraction functions are defined in order to identify each phase in a Cartesian grid. The computational results of added resistance in short waves using the two methods are systematically compared with experimental data for several ship models, including S175 containership, KVLCC2 and Series 60 hulls ( $C_B = 0.7, 0.8$ ). The present study includes the comparison with the established asymptotic and empirical formulae in short waves.

**Keywords** : Added resistance(부가저항), Rankine panel method(랭킨패널법), Cartesian grid method(직교격자법), Short-wave approximation(단파장 근사법), EEDI(에너지효율설계지수)

## 1. 서론

전통적으로 선박의 저항 문제는 입사파가 없는 정수상태에서 전진하는 경우에 대해 해석되었다. 하지만, 파랑에 의한 부가저항 문제는 최근 대두되고 있는 선박의 EEDI 도입과 파랑 중 저항 감소를 통한 고효율 선형 설계의 필요성과 함께 중요한 문제로 부각되고 있다 (Kim & Kim, 2010). 파랑에 의한 부가저항 문제는 운동과 저항을 동시에 해석해야 하는 문제이기 때문에 해석에 많은 어려움이 있다. 실험의 경우, 계측장비나 실험방법, 모형선의 크기 등에 따라 계측결과에 차이가 있고, 수치해석의 경우, 격자 및 수치기법 등에 따라 파랑 중 부가저항 값이 민감하게 변화한다.

파랑 중 부가저항 문제는 실험에 기반을 두어 많은 연구가 수행되었다. Fujii and Takahashi (1975)와 Nakamura and Naito (1977)는 S175 컨테이너선에 대해 실험을 진행하였고, 최근에는 Sadat-Hosseini, et al. (2013)가 KVLCC2 선형에 대해서 파랑 중 부가저항 실험을 수행한 바 있다.

수치적 방법을 이용한 파랑 중 부가저항 계산의 경우 이상유

동(ideal flow)에 근거한 포텐셜 기반 수치 기법들을 활용한 연구가 활발하게 진행되어왔다. 이상유동에 근거한 파랑 중 부가저항 계산 기법은 크게 두 가지 방법으로 구분되며, 이는 모멘텀 보존 방법(far-field method)과 압력직접 적분방법(near-field method) 등이다. 모멘텀 보존방법은 Maruo (1960)에 의해서 처음으로 제안되었으며, 물체 표면에서의 압력을 직접 계산할 필요가 없기 때문에 상대적으로 간단하게 계산할 수 있다. 따라서 현재까지도 세장체 이론(slender-body theory)에 근거한 운동해석에 추가되어 실제 공학적 문제에 많이 사용된다. 예를 들어, Kashiwagi, et al. (2009)은 개선된 통합이론(enhanced unified theory)을 적용한 모멘텀 보존방법을 사용하여 파랑 중 부가저항을 계산한 바 있다. 압력직접적분법의 경우에는 물체 표면의 2차 동유체 압력을 직접 적분하는 방법으로, 모멘텀 보존방법에 비해서 계산 과정이 좀 더 복잡하지만 파랑 중 부가저항 성분에 대한 물리적 해석이 용이하며, 다중 물체 문제나 비선형 문제로의 확장이 수월하다는 장점이 있다. 예를 들어, Faltinsen, et al. (1980)은 스트림 방법을 적용한 운동해석과 이 방법을 결합하여 파랑 중 부가저항을 계산한 바 있다. 이외에도 Choi, et al. (2000) 이 주파수 영역에서의 그린함수법(green function method)에 기반을 둔 압

력직접 적분방법을 사용하여 파랑 중 부가저항 해석을 수행하기도 하였다.

최근에 Joncquez (2009) 및 Kim and Kim (2010; 2011)은 시간 영역에서 고차의 랜킨패널법을 이용하여 규칙 파에서 부가저항을 계산한 바 있다. 두 연구에서는 운동량 보존방법과 압력직접 적분방법을 모두 사용하였으며, 경계 조건 문제를 선형화하기 위한 두 가지 대표적인 방법인 Neumann-Kelvin 및 double-body 선형화 방법을 적용하였다. 특히, Kim and Kim (2010; 2011)의 연구에서는 규칙 파에서만 아니라 시간영역에서 불규칙 파로 인한 부가저항을 해석하여 불규칙 파에서의 부가저항 해석을 위한 기준을 제시한 바 있다.

이에 반해 CFD를 이용한 연구는 아직 초기 단계이며, 주로 선박의 운동에 초점을 맞추어 진행되어 왔다. Orihara and Miyata (2003)는 선수규칙파 중 SR-108 컨테이너선에 대한 운동응답과 부가저항을 WISDAM-X라는 자체 개발 프로그램을 이용하여 해석한 바 있다. Visonneau, et al. (2008)은 ISIS-CFD라는 프로그램을 이용하여 선수규칙파 중 선박의 상하운동과 부가저항을 계산하였는데, 비정렬격자(unstructured mesh)를 사용하고 Analytical Weighting Mesh Deformation 기법을 적용하여 선박의 움직임에 구현하였다. Hu and Kashiwagi (2007)는 Constrained Interpolation Profile(CIP) 기법을 적용하여 직교격자에서 선박의 운동을 계산하는 프로그램을 개발하였고, 물체의 부피 비를 이용하여 직교격자 내부에서 물체를 표현하였다.

이러한 여러 기법들로부터 예측되는 부가저항 해석에서 선박의 선형설계에서 중요하게 다루어져야 하는 것은 단파장에서의 부가저항 예측이다. 이는 실제 상선들이 운항하는 일반적인 해양 환경이 대부분 대파고를 가지는 파랑상태가 아닌, 선박의 길이에 비해 파장이 짧은 영역에 속하기 때문이다. 즉, 단파장에서의 부가저항 성능이 선박의 연료효율과 관련하여 중요성이 높은 설계 인자이다. 특히 최근 선박설계에서 반드시 고려가 되어야 하는 EEDI(에너지효율설계지수)에서 부가저항은 매우 중요한 역할을 하는  $f_w$ 의 결정적 인자이기 때문에, 최근 들어 단파장에서의 부가저항 문제는 점차 중요성을 더해가고 있다.

본 연구에서는 최근 중요성이 높아지는 단파장에서의 부가저항을 예측하는 기법에 대하여 체계적으로 살펴보고자 한다. 특히, 대표적인 3차원 수치기법인 랜킨패널법과 CFD 기반의 두 수치기법을 적용하여 단파장에서의 부가저항을 계산하고, 이를 기존의 연구에서 제시된 점근적(asymptotic) 방법과 경험적 식들, 그리고 실험값들과 비교함으로써, 현재 사용되고 있는 수치기법들의 정확성과 활용성을 관찰하고자 한다.

본 연구에서 적용된 수치기법으로서는, 본 연구에 앞서 개발된 랜킨패널법 (Seo, et al., 2013) 과 직교격자에 기반을 둔 CFD 코드 (Yang, et al., 2012)를 사용하였다. 랜킨패널법에서는 비스플라인(B-spline) 함수를 도입한 고차 패널법을 적용하였으며, 경계면을 이산화 하여 3차원 랜킨소스를 선박의 표면과 자유표면에 분포하였다. 파랑 중 부가저항을 계산하기 위해서 물체 표면에서의 2차 동유체 입력을 구하여 적분하는 압력직접 적분 방법을 적용하였다.

직교격자법에서는 유한체적법에 근간하여 이산화를 하였고, 자유표면과 물체를 구분하기 위하여 주어진 셀에서 특정 물질이 차지하는 부피 비를 나타내는 밀도 함수를 도입하였다. 정수 중과 파랑 중 전진하는 선박에 대한 계산을 통해 선체에 작용하는 힘을 구하고, 각 경우의 전후방향 힘에 대한 시간 평균값 차이를 통해 파랑 중 부가저항을 계산하였다. 이 때, 상하동요(heave)와 종동요(pitch) 방향 운동만 고려되었으며, 선체에 작용하는 힘은 압력을 선체표면에서 적분하여 계산하였다.

기존 연구가 (Seo, et al., 2013; Yang, et al., 2013) 각 수치기법에 대한 개발과 이를 이용한 넓은 영역의 파장에 대한 부가저항 해석에 초점을 맞추었다면, 본 연구에서는 단파장 영역에서 부가저항 해석에 초점을 두었다. 특히, 여러 선형에 따른 개발된 수치해석기법과 기존의 이론식 및 경험식이 갖는 정확도와 한계 등을 고찰하고자 한다.

## 2. 해석기법

### 2.1 랜킨패널법

입사파가 존재하는 무한수심의 자유표면상을 일정한 전진속도  $U$ 로 진행하고 있는 선박에 대해서 Fig. 1과 같이 정의되는 물체 고정 좌표계를 생각할 수 있다. 선박으로 입사하는 파는 규칙파이며,  $A$ ,  $\omega$ 는 입사파의 진폭과 주파수를 나타내며,  $\beta$ 는 입사각을 의미한다. 선박의 운동은 평균위치에서 정의되며, 병진운동  $\xi_T = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 과 회전운동  $\xi_R = (\xi_4, \xi_5, \xi_6)$ 의 6 자유도 운동을 한다.

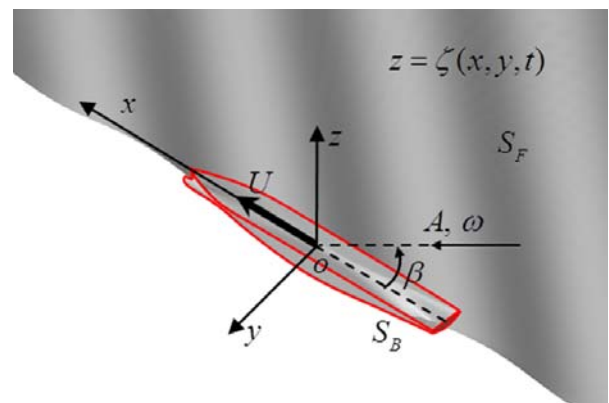


Fig. 1 Coordinate system for Rankine panel method

선박운동을 해석하기 위해서 일반적으로 많이 사용되는 속도포텐셜을 도입하였으며, 이상유체의 비회전 유동을 가정하면 라플라스 방정식과 다음의 경계조건을 만족하는 속도포텐셜,  $\phi$ 를 도입할 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in fluid domain} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \vec{U} \cdot \vec{n} + \frac{\partial \delta}{\partial t} \cdot \vec{n} \quad \text{on } S_B \quad (2)$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \phi) \cdot \nabla \right] [z - \zeta(x, y, t)] = 0 \quad (3)$$

on  $z = \zeta(x, y, t)$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - \vec{U} \cdot \nabla \right) \phi = -g\zeta - \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad (4)$$

on  $z = \zeta(x, y, t)$

$\vec{\delta} (= \vec{\xi}_T(t) + \vec{\xi}_R(t) \times \vec{x})$ 는 임의의 지점에서의 선박의 변위를 나타내며,  $\zeta$ 는 파고(wave elevation)를 의미한다.  $\vec{n}$ 은 선박의 표면에서의 법선벡터를 의미하며,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다. 식 (3)은 운동학적 자유표면 경계조건(kinematic free-surface boundary condition)이며, 식 (4)는 동역학적 자유표면 경계조건(dynamic free-surface boundary condition)이다.

위의 경계 조건 문제를 선형화하기 위해서 속도포텐셜과 파고를 다음과 같이 정의하였다.

$$\phi(\vec{x}, t) = \Phi(\vec{x}) + \phi_I(\vec{x}, t) + \phi_d(\vec{x}, t) \quad (5)$$

$$\zeta(\vec{x}, t) = \zeta_I(\vec{x}, t) + \zeta_d(\vec{x}, t) \quad (6)$$

여기서  $\Phi$ 는 기본 포텐셜을 나타내며, 아래첨자  $I$ 와  $d$ 는 각각 입사파 및 교란파와 관련된 성분을 의미한다. Neumann-Kelvin 선형화 방법을 적용하는 경우 기본 포텐셜  $\Phi$ 는 균일류 포텐셜  $(-Ux)$ 이 되며, double body 선형화 방법을 적용하는 경우에는  $z=0$ 을 대칭으로 이미지 물체를 두어 무한 유체장에서  $\partial \Phi / \partial n = \vec{U} \cdot \vec{n}$ 을 만족하는 경계조건 문제를 풀어  $\phi$ 를 계산한다.

위의 문제에 대한 선형화된 경계치 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial n} = \sum_{j=1}^6 \left( \frac{\partial \xi_j}{\partial t} n_j + \xi_j m_j \right) - \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{on } \overline{S_B} \quad (7)$$

$(m_1, m_2, m_3) = (\vec{n} \cdot \nabla)(\vec{U} - \nabla \Phi)$   
 $(m_4, m_5, m_6) = (\vec{n} \cdot \nabla)(\vec{x} \times (\vec{U} - \nabla \Phi))$

$$\frac{\partial \zeta_d}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla \zeta_d \quad (8)$$

$$= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \zeta_d + \frac{\partial \phi_d}{\partial z} + (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla \zeta_I \quad \text{on } z = 0$$

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla \phi_d \quad (9)$$

$$= -\frac{\partial \Phi}{\partial t} - g\zeta_d + \left[ \vec{U} \cdot \nabla \Phi - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi \right]$$

+  $(\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla \phi_I \quad \text{on } z = 0$

여기서  $\overline{S_B}$ 는 평균위치에서의 물체 표면을 의미하며,  $m_j$ 는  $m$ -항이라고 불리며, 속도에 의해서 발생하는 정상해와 선박의 운동에 의한 비정상해의 연성효과를 포함하고 있다.

선박이 강제인 경우에 운동방정식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$[M_{jk}] \{ \ddot{\xi}_k \} = \{ F_{F.K.j} \} + F_{H.D.j} + F_{Res.j} \quad (10)$$

여기서  $M_{jk}$ 는 질량을 나타내고,  $F_{F.K.}$ ,  $F_{Res.}$ 는 Froude-Krylov 힘 및 복원력을 의미한다.  $F_{H.D.}$ 는 Froude-Krylov 힘과 복원력을 제외한 선박의 운동과 파의 산란으로 발생하는 유체동역학적 힘이다.

본 연구에서 적용된 랜킨패널법에서는 파랑 중 부가저항을 해석하기 위해서 다음과 같은 수식을 도입하여 압력을 직접 적분한다.

$$\vec{F}_2 = \int_{WZ} \frac{1}{2} \rho g (\zeta - (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x))^2 \cdot \vec{n} dL \quad (11)$$

$$- \rho \int_{WZ} \left( -(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) (\zeta - (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x)) \cdot \vec{n}_1 dL$$

$$- \rho \int_{WZ} \vec{\delta} \cdot \nabla \left( -(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) \left( (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x) \right) \cdot \vec{n}_1 dL$$

$$- \rho \iint_{\overline{S_B}} g z \cdot \vec{n}_2 ds - \rho \iint_{\overline{S_B}} \frac{1}{2} (\nabla(\phi_I + \phi_d) \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d)) \cdot \vec{n}_1 dL$$

$$- \rho \iint_{\overline{S_B}} \left( g(\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x) + \frac{\partial(\phi_I + \phi_d)}{\partial t} \right) \cdot \vec{n}_1 ds$$

$$- \rho \iint_{\overline{S_B}} \vec{\delta} \cdot \nabla \left( \frac{\partial(\phi_I + \phi_d)}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d) \right) \cdot \vec{n} ds$$

$$- \rho \iint_{\overline{S_B}} \left[ -(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right] \cdot \vec{n}_2 ds$$

$$- \rho \iint_{\overline{S_B}} \vec{\delta} \cdot \nabla \left( -(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) \cdot \vec{n}_1 ds$$

$$\vec{n}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\xi_6 & \xi_5 \\ \xi_6 & 0 & -\xi_4 \\ -\xi_5 & \xi_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$\vec{n}_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -(\xi_5^2 + \xi_6^2) & 0 & 0 \\ 2\xi_4 \xi_5 & -(\xi_4^2 + \xi_6^2) & 0 \\ 2\xi_4 \xi_6 & 2\xi_5 \xi_6 & -(\xi_4^2 + \xi_5^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$\vec{n}$ 은 선박의 법선 벡터이며,  $\vec{n}_1$ ,  $\vec{n}_2$ 는 각각 1차, 2차 법선 벡터를 의미한다.  $WZ$ 은 선박의 수선면을 나타낸다. 위 식은 다른 비선형 하중은 고려하지 않고 선형해로부터 구해지는 2차 유체

력 만을 정리한 것으로서, 부가저항은 이 식으로 구해지는 유체력의 평균값으로 정의된다. 운동 및 부가저항의 수치해석에 대한 자세한 내용은 Seo, et al. (2013)에서 확인할 수 있다.

### 2.2 직교격자법

비정상, 비점성, 비압축성 유체에 대한 연속방정식과 Euler 방정식은 다음과 같다.

$$\int_{\Gamma} (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS = 0 \tag{14}$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} dV = - \int_{\Gamma} \vec{u} (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS - \frac{1}{\rho} \left[ \int_{\Gamma} p \vec{n} dS - \int_{\Omega} \vec{f}_b dV \right] \tag{15}$$

여기서  $\Omega$ 는 전체 영역을 의미하고  $\Gamma$ 는 영역의 경계를 나타낸다.  $\vec{n}$ 은 경계면에서 영역 바깥쪽을 향하는 법선벡터이고,  $\vec{f}_b$ 는 외력항을 의미한다. 속도,  $\vec{u}$ 와 압력,  $p$ 의 연성은 비정상 유동계산에 효율적인 다단계 방법(fractional step method)을 사용하였다. 본 수치기법에서는 대류 항에 대한 시간 차분에 대해서는 1차의 명시적 오일러(explicit Euler) 기법을, 압력-포아송 방정식에 대한 수치계산에서는 Bi-conjugate gradient stabilized(Bi-CGSTAB) 기법을 이용하였다. 또한, 대류 항의 공간에 대한 이산화는 각 셀 경계에서의 플럭스를 통해 이루어지며, monotized central 제한자(limiter)를 이용하여 각 셀 경계에서의 속도를 계산하였다. 그리고 3차원 효과를 고려하기 위하여 directional splitting 방법을 사용하였고, 압력 항에 대해서는 통상적으로 사용되는 중심차분법(central difference scheme)을 사용하여 이산화 하였다.

직교 격자계(cartesian grid)를 사용하여 선박의 운동과 파랑 중 부가저항을 계산하기 위하여 Fig. 2와 같이 각 격자에서 서로 다른 물질이 차지하는 부피 비를 나타내는 밀도 함수( $\phi_m$ ,  $m=1$ : 물,  $m=2$ : 공기,  $m=3$ : 물체)를 정의하였다.  $\phi$  대한 이송 방정식은 VOF 계열 기법 중 하나인 tangent of hyperbola for interface capturing(THINC, Xiao, et al., 2005) 기법과 다차원 효과를 고려하는 weighed line interface calculation(WLIC, Yokoi, 2007) 기법을 사용하여 계산하였다. 각 셀에서 물체에 대한 밀도 함수 값을 알고 있는 경우 다음 식을 이용하여 물체경계 조건을 만족 시키게 된다 (Hu & Kashiwagi, 2007).

$$\vec{u}^{**} = \vec{u}^* (1 - \phi_3^u) + \vec{U}_{body} \phi_3^u \tag{16}$$

여기서  $\vec{U}_{body}$ 는 속도가 정의된 검사체적 중심에서 물체의 속도를 나타내고,  $\phi_3^u$ 는 각 속도 검사체적에 대한 물체의 부피 비를 의미한다. 위 식을 사용하는 경우 물체경계 조건을 정확한 물

체표면에서 만족하지 않지만, 관성력이 지배적인 문제에는 정확한 결과를 제공한다.

선체에 작용하는 힘과 모멘트는 다음 식과 같이 면적분을 이용하여 계산되며, 본 연구에서는 압력에 의한 성분만 고려하였다.

$$\vec{F} = - \sum_{i=1}^{nFace} p_i n_i \Delta S_i \tag{17}$$

$$\vec{M} = - \sum_{i=1}^{nFace} (x_i^c - x_{cg}) \times n_i p_i \Delta S_i \tag{18}$$

여기서 'nFace'는 물체 표면을 표현하는 삼각형 요소 전체 개수를 의미하고,  $p$ ,  $\Delta S$ ,  $n$ 은 각각 직교 격자로부터 구해진 선체표면에서의 압력과 선체표면 요소의 면적 및 법선벡터를 의미한다. 아래첨자  $i$ 는 각 선체표면 요소의 색인(index)을 의미하고  $x^c$ 와  $x_{cg}$ 는 각각 물체를 표현한 삼각형 요소의 중심 및 물체의 무게중심 좌표를 뜻한다. 수치기법에 대한 보다 자세한 내용은 Yang, et al. (2012)에서 찾을 수 있다.

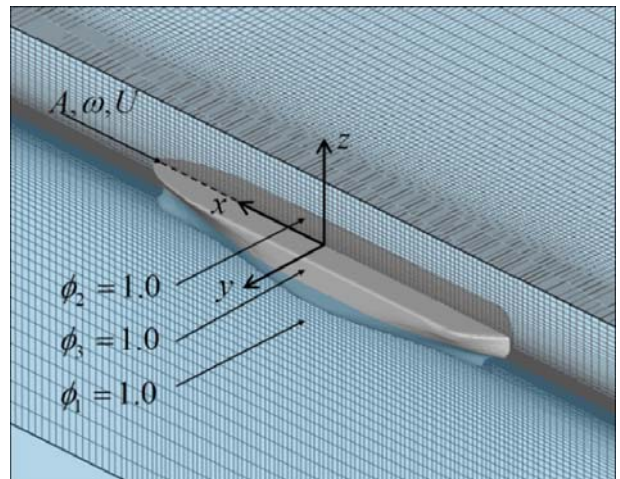


Fig. 2 Coordinate system for Cartesian grid method

### 2.3 이론식 및 경험식

단파장 영역에서 부가저항을 계산할 때, 선수부에서 산란되는 파의 비선형성을 고려해야 하기 때문에 수치적으로 정확한 계산에 어려움이 있다. 이를 보완하기 위하여 단순화된 가정에 근거한 이론식과 실험에 근거한 경험식이 제안된 바 있다.

Faltinsen, et al. (1980)은 파랑 중 부가저항에 대한 다음의 이론적 점근식(asymptotic equation)을 유도하였다. 파장이 짧은 파가 입사하는 경우, 파에 노출된 영역에서는 완전반사가 발생한다고 가정하였다. 또한, 국부 정상 유동(local steady flow)에 대한 속도를 단순히 물체 표면에 대한 선박 전진속도의 접선 성분으로 가정하였고, 물체를 정수면에서 단면을 갖는 실린더 형상으로 생각하였다.

$$R = \frac{1}{2} \rho g \zeta_I^2 \int_L \left[ \frac{1 \omega U}{g} [1 + \cos \theta \cos (\theta - \beta)] \right] \vec{n} dL \quad (19)$$

$$\begin{aligned} n_1 &= \sin \theta \\ n_2 &= \cos \theta \\ n_6 &= x_0 \cos \theta - y_0 \sin \theta \end{aligned}$$

식 (19)에서 정의되는 적분영역은 Fig. 3에서 파에 직접적으로 노출된 영역, A-F-B 구간이다.

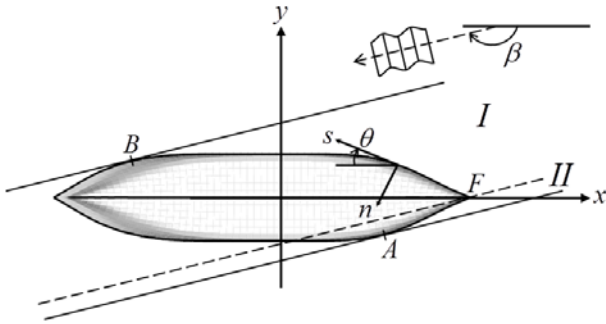


Fig. 3 Coordinate system for the added resistance calculation in short waves (Faltinsen, et al., 1980)

단파장에서의 부가저항을 계산하는 다른 방법으로, 고정된 수직의 원기둥에 가해지는 표류력에 대한 식을 선박에 적용할 수 있도록 몇 가지 가정을 통하여 보정계수( $\alpha_d, 1+\alpha_d$ )를 적용한 경험식을 Fujii and Takahashi (1975)가 제시한 바 있다. 최근에 일본의 National Maritime Research Institute(NMRI)에서는 Fujii and Takahashi (1975)의 식을 기본으로 하되, 여러 실험값을 사용하여 보정계수의 보완한 식을 다음과 같이 제시하였다 (Tsujiyama, et al., 2008; Kuroda, et al., 2008).

$$\begin{aligned} R &= \alpha_d (1 + \alpha_U) \left[ \frac{1}{2} \rho g \zeta_I^2 B B_f(\beta) \right] \quad (20) \\ B_f(\beta) &= \frac{1}{B} \left[ \int_I \sin^2(\theta - \beta) \sin \theta dl \right. \\ &\quad \left. + \int_{II} \sin^2(\theta + \beta) \sin \theta dl \right] \\ 1 + \alpha_U &= 1 + f(Fn); \quad \alpha_d = \frac{\pi^2 I_1^2(\chi)}{\pi^2 I_1^2(\chi) + K_1^2(\chi)} \end{aligned}$$

Table 1 Coefficients of empirical formula

|                            | $f(Fn)$                                 | $\chi$           |
|----------------------------|---|------------------|
| Fujii and Takahashi (1975) | $5 \sqrt{Fn}$                           | $kd$             |
| NMRI                       | $Fn \times \max[10.0, -310B(\beta)+68]$ | $\omega_s^2 d/g$ |

이 경험식의 보완점이라고 할 수 있는 부분은 반사계수( $\alpha_d$ )에 대한 식에서 전진속도를 고려한 파수(wave number)를 사용한 점, 전진속도의 영향을 고려한 보정계수( $1+\alpha_d$ )에서 실험값을 반영한 식을 사용한 점이며, 이를 통해 날씬한 형상을 가진 선박에서도 좋은 결과를 기대할 수 있다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 계산 모델 및 격자

본 연구에서 사용한 선박 모델은 Series 60( $C_B=0.7, 0.8$ ), S175 컨테이너선 및 KVLCC2 선형이다. 랜킨패널법의 경우는 네 가지 경우에 대해 모두 계산을 수행하였고, 직교격자법의 경우 계산 시간의 제약으로 S175컨테이너선과 KVLCC2선형에 대해서만 계산이 수행되었다. 입사파는 모든 계산에 대해 선수파( $\beta=180^\circ$ ) 경우만 고려하였다. 각 선형에 대한 제원은 Table 2에 정리되어 있다.

Table 2 Main dimension of test models

| Model    | $L(m)$ | $B(m)$ | $D(m)$ | $C_B$  |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| Series60 | 100.0  | 14.29  | 5.72   | 0.7    |
|          | 100.0  | 15.39  | 6.15   | 0.8    |
| S175     | 175.0  | 25.4   | 9.5    | 0.561  |
| KVLCC2   | 320.0  | 58.0   | 20.8   | 0.8098 |

Fig. 4는 S175 컨테이너선과 KVLCC2 선형에 대해 직교격자법에서 사용한 삼각형 표면 격자와 이를 통해 계산된 물체 표면( $\phi_3=0.5$ )을 나타낸다. 직교격자 내부에서 선박의 형태가 비교적 정확하게 표현되는 것을 확인할 수 있으며, 정량적인 비교는 Yang, et al. (2012)에서 찾을 수 있다.

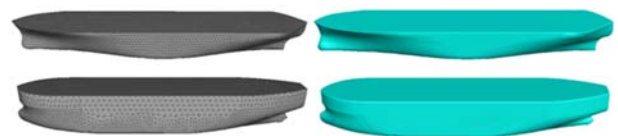


Fig. 4 Triangle surface meshes and iso-surface ( $\phi_3=0.5$ ) of calculated body volume fraction for S175 containership (upper) and KVLCC2 (lower)

Fig. 5는 선박의 운동 계산에 사용되는 패널과 직교격자를 나타낸다. 랜킨패널법의 경우 원형 격자를 사용하였으며, 선박으로부터 다섯 파장의 계산 영역을 가진다. 이 때, 방사조건을 만족하기 위하여 끝 쪽 두 파장에 대하여 감쇠영역을 사용하였다. 직교격자법의 경우 역시 끝 쪽 두 파장에 감쇠영역을 사용하였고,

입사파 영역은 파장 길이의 두 배로 설정하였다. 이 때, 입사파의 파장 ( $\lambda/L=0.3\sim 1.0$ )에 따라 계산 영역이 달라지며, 각 파장에 따라 서로 다른 패널과 직교격자가 사용되었다. 이에 대한 자세한 내용은 Yang, et al. (2013)의 기존 연구에 잘 설명이 되어 있다.

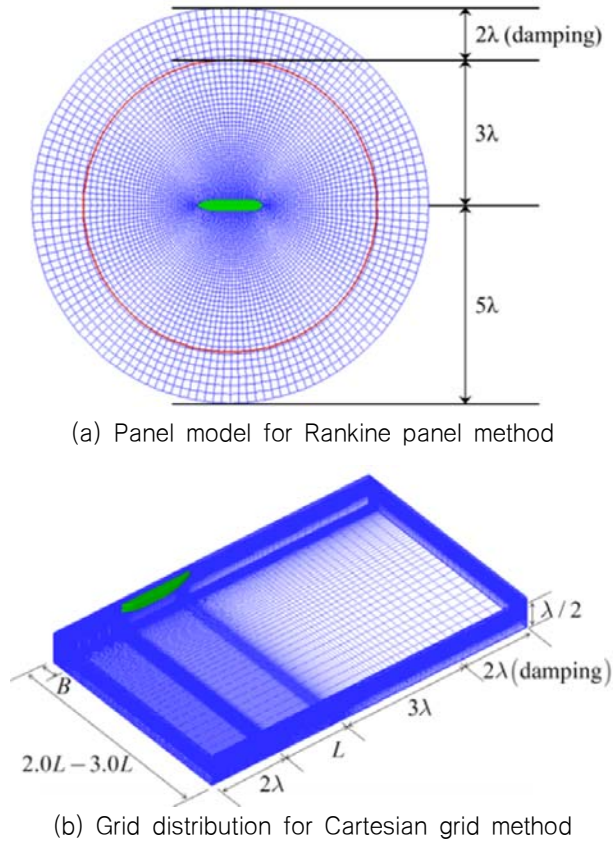
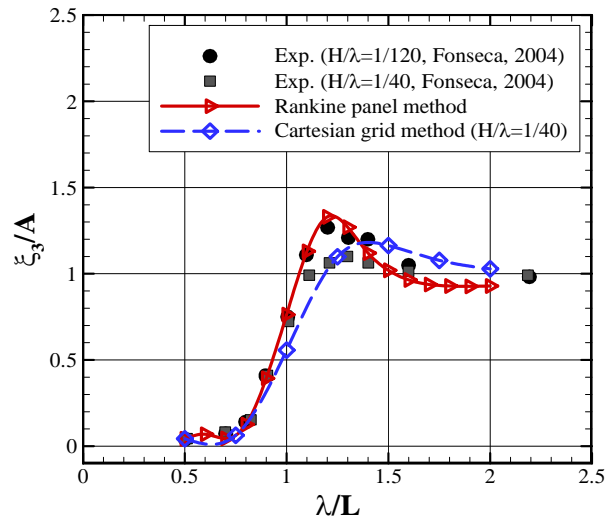


Fig. 5 Examples of solution grid for two different numerical methods

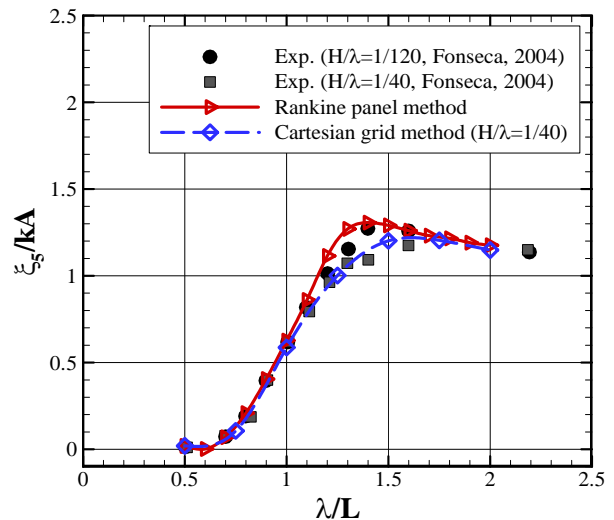
### 3.2 운동해석

Fig. 6 와 Fig. 7은 S175 컨테이너선과 KVLCC2 선형에 대하여 선수파 중 상하동요와 종동요의 파장에 따른 운동응답을 계산한 결과이다. 각각의 운동응답 결과는 실험 결과와 (Fonseca & Soares, 2004; Lee, et al., 2013) 비교하였고, 상하동요 및 종동요를 제외한 나머지 운동은 구속된 상태로 계산하였다. 직교격자법의 경우 실험 조건 중 파고 높은  $H/\lambda=1/40$ 을 적용하여 계산을 수행하였고, 랜킨패널법의 경우 선형화 가정이 만족하는 파고 ( $H/\lambda < 1/100$ )를 적용하였다.

운동응답의 경우 특히 공진 주파수 부근에서 파고에 의한 영향이 두드러지게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 상하동요 및 종동요의 경우 큰 파고에서는 운동응답이 작은 파고의 경우에 비하여 조금 작게 나타나는 경향을 보이고 있는데, 이는 비선형 운동에서 흔히 관찰되는 현상이다. 쉽게 이해할 수 있는 바와 같이 랜킨패널법의 경우  $H/\lambda=1/120$ 의 실험 결과와 유사한 경향을 보이며, 직교격자법의 경우는  $H/\lambda=1/40$ 에 대한 실험결과와 유사한 것을 확인 할 수 있다.



(a) Heave

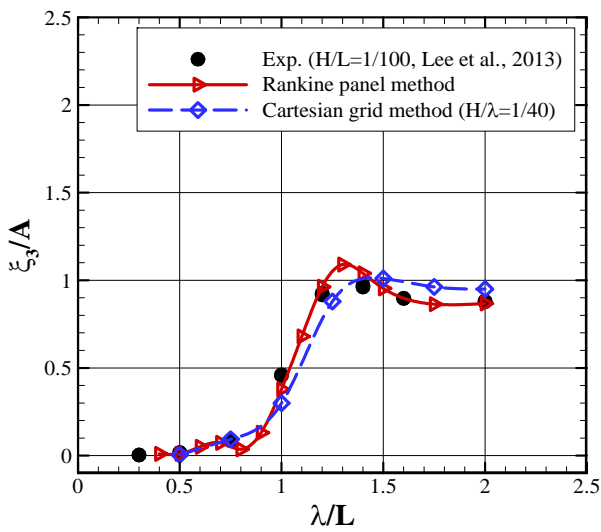


(b) Pitch

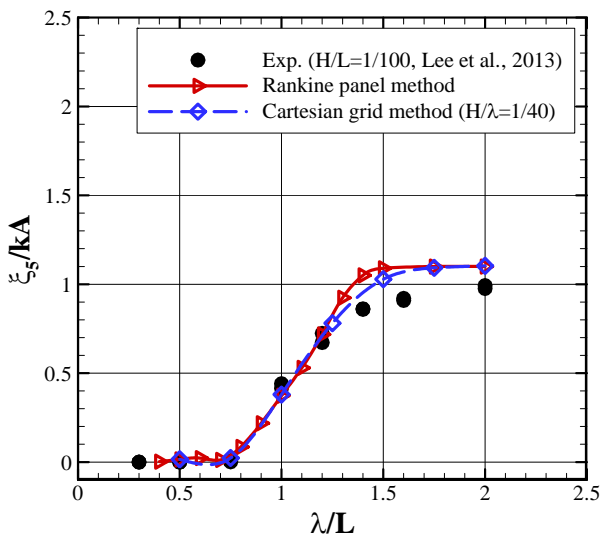
Fig. 6 Vertical motion responses of S175 containership ( $F_n = 0.25$ )

직교격자법의 경우 파장과 파고에 따라 각각  $x$ 방향과  $y$ 방향 격자가 결정된다. 때문에 파고를 일정하게 하면 장파장 영역에서 격자의 종횡비가 지나치게 증가하여 계산이 불안정하거나, 입사파가 부정확하게 생성되는 문제가 발생한다. 이러한 이유로 KVLCC2의 경우, 실험보다 큰 파고에 대해 파 기울기를 일정하게 하여 계산이 수행되었다.

Fig. 7은 KVLCC2 선형에 대한 운동응답 계산결과를 실험과 비교한 것이다. 파장이 비교적 긴 영역에서 종동요 운동 응답의 계산 결과는 서로 유사하지만 계산결과들이 실험에서 관찰된 값들보다 조금 크게 계산되었다. 실험의 경우 전후동요를 고정하지 않은 반면, 계산에서는 전후동요를 고정하였다. 이러한 차이가 장파에서 종동요 운동 응답에 영향을 미치는 것으로 일부 계산과 실험 (Sadat-Hosseini, et al., 2013) 에서 관찰되었으나, 추후 보다 자세한 비교연구가 필요한 부분이다. 이를 제외한 나머지 영역에서는 실험과 두 계산 결과가 잘 일치하는 것으로 판단된다.



(a) Heave



(b) Pitch

Fig. 7 Vertical motion responses of KVLCC2 ( $F_n = 0.142$ )

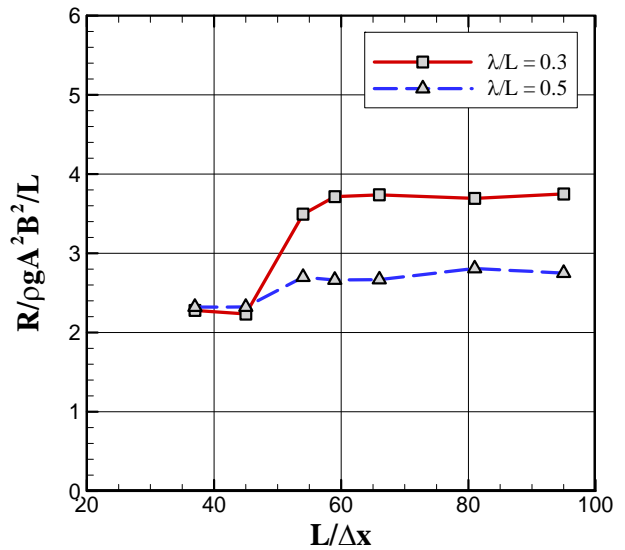
### 3.3 파랑 중 부가저항해석

단파장 영역에서 부가저항을 계산하기 위해서는 선수부 주변의 국부적인 유동을 정확하게 해석해야 한다. 이를 위해 물체 주변의 패널 혹은 격자수가 입사파와 산란되는 파의 특성을 충분히 표현할 만큼 많아야 하며, 이에 대한 수렴도 테스트를 반드시 수행해야 한다.

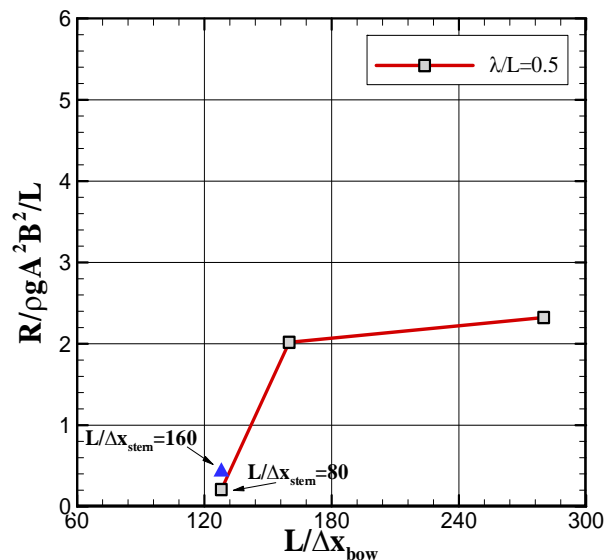
Fig. 8은 KVLCC2 선형에 대하여 패널법과 직교격자법의 격자 수렴도 테스트를 수행한 결과이다. 랭킨패널법의 경우 원형 격자를 사용하였기 때문에 선체의 길이방향에 대한 패널수는 패널의 반경방향에 대한 패널수로 나타낼 수 있다. 서로 다른 파장에 대하여 반경방향 패널수를 증가시킴에 따라 부가저항 값이 수렴하는 것을 확인 할 수 있다. 즉, 단파장 영역에서 선체에 의해 산란되는 파 성분을 랭킨패널법을 사용하여 정확하게 해석하기에는

어려움이 있지만, 많은 수의 패널을 사용하여 수렴된 부가저항 값을 얻을 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 수렴성 테스트 결과를 바탕으로 부가저항 값의 차이가 약 1% 내외가 되는 패널을 기준으로 삼았으며, 입사파 파장에 따라 반경방향으로 패널을 80~100개의 분포시켰을 때 계산된 결과를 택하였다.

직교격자법의 경우 기존 연구 (Yang, et al., 2013) 결과를 바탕으로 격자를 구성하였다. 가장 작은 격자 크기 기준으로,  $B/\Delta y_{min}=30$ ,  $A/\Delta z_{min}=20$  이며 길이 방향에 대해서는  $L/\Delta x_{bow}=128$ , 160, 280의 격자에 대해 결과를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. KVLCC2 선형의 경우 파랑 중 부가저항이 선체의 길이방향에 대한 의존도가 큰 것으로 관찰되었으며, 선미 부근의 격자수 보다는 선수 부근의 격자수에 민감하게 변하는 것을 확인하였다.



(a) Rankine panel method



(b) Cartesian grid method

Fig. 8 Grid convergence test of added resistance for KVLCC2 ( $F_n = 0.142$ )

Fig. 9는 직교격자법에 대해 선수 부근 격자크기에 따른 선수 주위의 파형을 보여준다. 격자의 조밀도에 따라 선수 부근에서 약간의 파고차이가 있음을 알 수 있고, 이는 결국 선수면에 가해지는 압력의 차이, 그리고 궁극적으로 파랑 중 부가저항의 차이를 가져온다. 다만, 직교격자법의 경우 길이 방향 격자를 조밀하게 하면, Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 조건에 따른 시간 간격(time step)에 대한 제약이 강해져 계산 시간이 증가하게 된다. 때문에 랜킨패널법에 비해 수렴된 결과를 얻는 데 어려움이 있으며, 정량적인 값을 실험과 비교하는 데 주의가 요구된다.

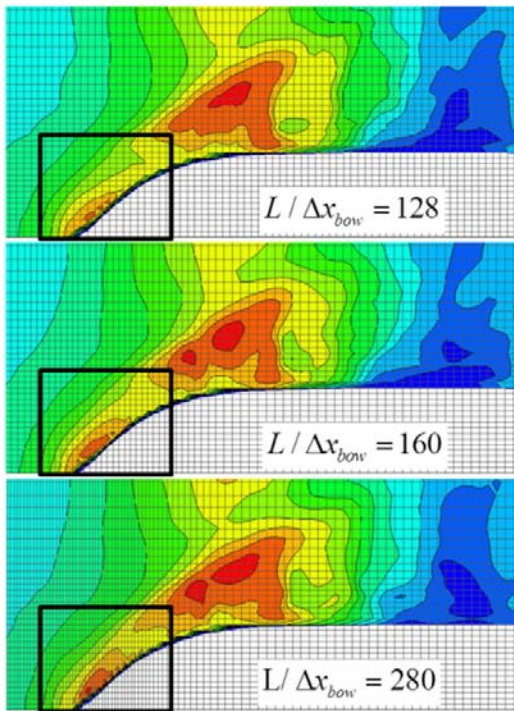
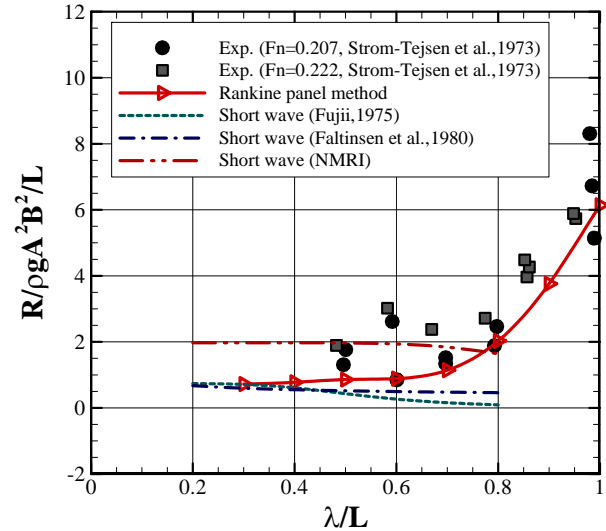


Fig. 9 Instantaneous wave contours computed with three different mesh resolutions for KVLC2 (Fn = 0.142, Cartesian grid method)

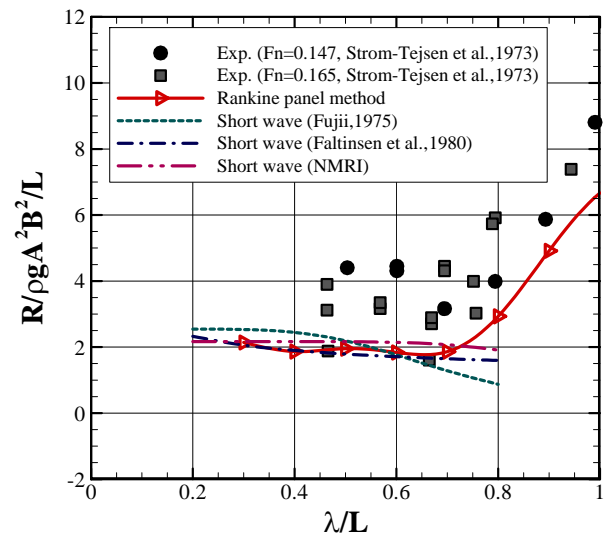
앞서 소개되었던 네 가지 선형에 대하여 단파장 영역에서 부가저항을 계산하여 실험 (Storm-Tejsen, et al., 1973; Fujii & Takahashi, 1975; Nakamura & Naito, 1977; Lee, et al., 2013), 이론식 및 경험식 (Faltinsen, et al., 1980; Fujii & Takahashi, 1975; Kuroda, et al., 2008)과 비교하여 Fig. 10과 11에 나타내었다.

Series60 선형의 경우 두 가지 서로 다른 CB 값을 갖는 선형을 대상으로 파랑 중 부가저항을 계산하였는데,  $C_B=0.7$ 인 경우 NMRI에서 제안된 식이 실험과 가장 유사한 값을 주었고 다른 경험식과 이론식, 랜킨패널법에 의한 계산 결과들은 실험결과보다 작은 값들이 예측되었다. 반면  $C_B=0.8$ 인 경우에는 랜킨패널법의 결과가 이론식 및 경험식과 유사하게 나타났다. 이는 뭉툭한 선형인 경우 랜킨패널법도 NMRI의 방법과 비슷한 정도의 단파장 영역에서 부가저항 값을 계산할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 경향은 Fig. 11에 나타낸 S175컨테이너선과 KVLC2 선형에

대해서도 유사하게 나타난다. 반면 직교격자법의 경우, 선형에 관계없이 랜킨패널법 보다 실험에 근접한 결과를 보여주었다. 다만, 직교격자법의 경우 격자에 대한 민감도가 크기 때문에 정량적인 값을 비교하는 데 주의가 요구된다.



(a)  $C_B=0.7$ ,  $Fn = 0.222$

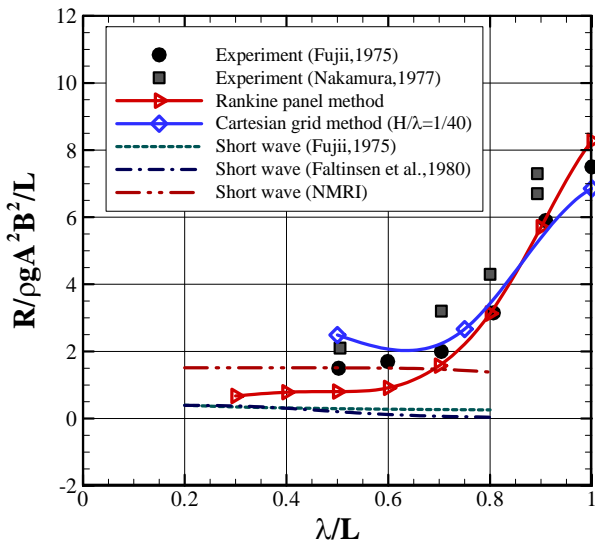


(b)  $C_B=0.8$ ,  $Fn=0.15$

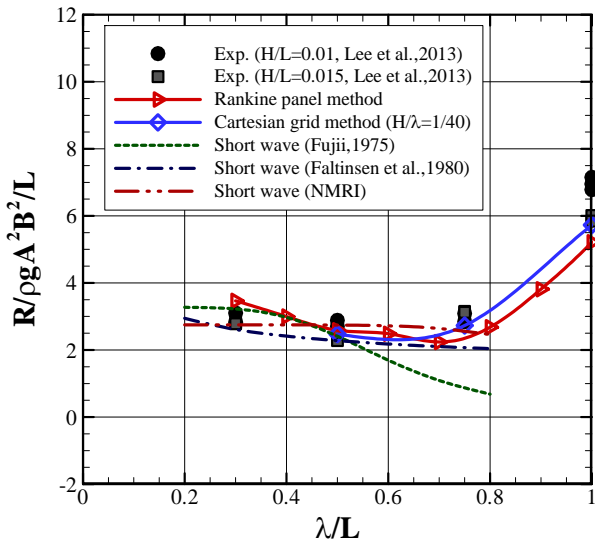
Fig. 10 Added resistance in short waves for Series60

이러한 차이를 해석하기 위하여 이론식에 적용된 가정을 살펴볼 필요가 있다. 이론식을 유도하는 데 있어 두 가지 중요한 가정은, 국부적인 정상유동 속도에 대한 가정과 물체형상을 정수면 까지만 고려하는 것이다. 두 번째 가정은 랜킨패널법에서도 적용되는데, 선형(linear) 가정 하에 문제를 해석하기 때문에 정수면 위쪽의 형상이 고려되지 않고 정수면 까지 존재하는 물체만 고려된다. 반면, 직교격자법이나 실험의 경우 정수면 위쪽의 형상 변화에 대한 영향도 고려할 수 있다. 즉, 정수면 아래 위의 선형변화에 따른 비선형 특성이 파랑 중 부가저항에 영향을 미친 것으로 판단된다.





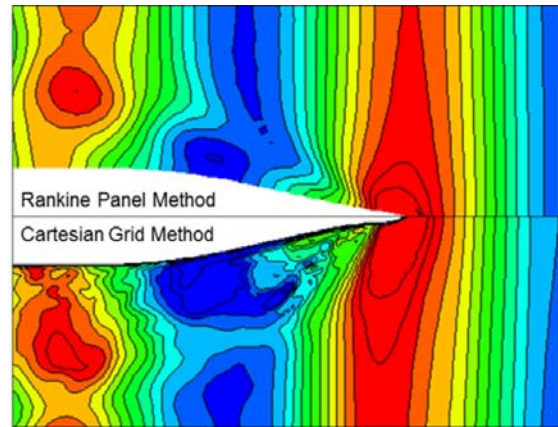
(a) S175 containership,  $Fn=0.2$



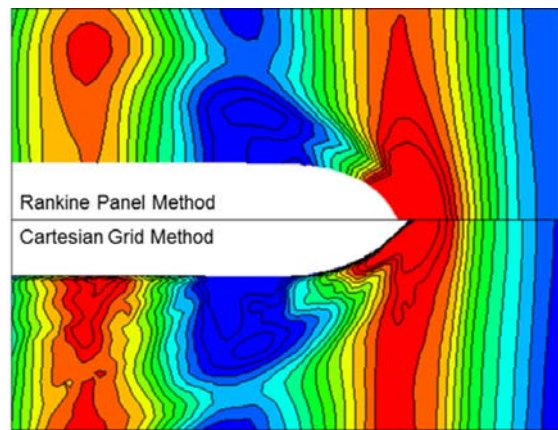
(b) KVLC22,  $Fn=0.142$

Fig. 11 Added resistance in short waves for S175 and KVLC22

랜킨패널법과 직교격자법을 이용하여 얻은 S175 컨테이너선과 KVLC22에 대한 선수 근처 파형을 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 랜킨패널법의 경우 정수면 기준 선박의 단면 형상과 파형을 나타내지만, 직교격자법의 경우 파형을 구하기 위해 3차원 밀도 함수값( $\phi$ ,  $\phi_b$ )을 이용하여 2차원 결과로 변환하였다. 때문에, 구상선수가 존재하는 선수부 쪽 형상 표현에 차이가 발생한 것을 알 수 있다. KVLC22의 경우, 산란되는 파의 형태나 등고선의 밀집도 등이 두 수치방법에서 유사하게 나타났지만, S175 선형의 경우 선수 근처 파형에서 차이가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 특히, KVLC22에 비해 S175 선형의 경우 선수부터 중앙평행부가 나타나기 이전까지 선체 표면에서 파고의 높이가 차이는 것을 알 수 있고, 이러한 차이가 결과적으로 파랑 중 부가저항의 차이로 나타났다고 판단된다.



(a) S175 containership



(b) KVLC22

Fig. 12 Comparison of wave contour around ship bow region: Rankine panel method (upper) and Cartesian grid method (lower)

본 계산 모델 중 KVLC22 선형의 경우에는 정수면 근처 위아래의 단면의 차이가 크지 않지만, S175 선형의 경우 위쪽으로 갈수록 단면의 폭이 넓어지는 선형이다. 이러한 물체 및 자유표면 상에서의 비선형성 효과가 파랑 중 부가저항에 미치는 영향에 대해서는 추후 더욱 체계적인 연구가 필요하다.

### 4. 결론

본 연구에서는 랜킨패널법과 직교격자 기반의 수치기법 및 경험식과 이론식을 이용하여 전진하는 선박에 대한 단파장에서의 부가저항을 해석하였다. 각 기법을 통해 얻어진 결과를 모형시험 결과와 비교하였고, 이상의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 랜킨패널법이나 직교격자법과 같은 수치기법을 이용하여 단파장에서의 부가저항을 해석함에 있어 격자 수렴도 테스트는 필수적으로 수행되어야 하며, 랜킨패널법의 경우 반경 방향에 패널이 80개 이상 사용되는 경우 파랑 중 부가저항 값은 실험과 약 5%내외의 차이를 보였다. 직교격자법은 선수 근처의 길이 방향 격자에 따라 부가저항 값이 크게 차이 났으며, 가장 조밀

한 격자에서 실험과 약 8% 정도 차이가 나타났다. 다만, 직교 격자법의 경우 격자에 대한 민감도가 크고 계산 시간의 제약이 있기 때문에 정량적인 값을 비교하는 데 주의가 요구된다.

- 단파장 영역에서 부가저항은 선수부의 형상, 특히 선수부의 뭉툰함(bluntness)과 정수면 위쪽의 변화에 민감한 결과를 보였다. 이론식과 랜킨패널법의 경우 상대적으로 얇은(slender) Series60( $C_B=0.7$ )와 S175 선형에 대해서는 실험보다 약 20~40% 작은 단파장에서의 부가저항을 예측하였고, 뭉툰함(blunt) 선형인 Series60( $C_B=0.8$ )과 KVLCC2에 대해서는 실험과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 반면, 경험식의 경우 실험에 의해 전진속도에 대한 보정계수를 수정한 NMRI의 식이 모든 선형에 대해 상대적으로 실험 결과에 근사한 예측을 하였다.
- 선수 부근에서 정수면 위쪽의 형상 변화가 심하여 물체의 비선형성이 고려되어야 하는 경우, 직교격자법이나 실험을 통한 경험식이 단파장 영역에서 부가저항을 해석하는 데 사용되어야 한다. 반면, 선수가 상대적으로 비대하거나 정수면 위쪽의 형상 변화가 심하지 않아 선형(linear) 가정에 부합하는 선박에 대해서는 랜킨패널법이나 이론식만으로도 단파장 영역에서 부가저항을 비교적 정확하게 예측 할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 주주사업인 “해양구조물의 이송·설치를 위한 작업성능 평가기술 개발” 및 지식경제부의 “에너지 절감을 위한 선박 저항감소 및 추진성능 향상 핵심기술 개발” (과제번호: 10040030), 그리고 로이드기금 연구센터 (LRF\*—Funded Research Center)에서 지원하는 연구과제의 일환으로 진행되었습니다. 모든 지원기관들에게 감사를 드립니다. (\*LRF: Lloyd’s Register Foundation) 또한 서울대학교 공학연구소와 해양시스템 공학연구소(RIMSE)의 행정적 지원에도 감사를 포함합니다.

## References

- Choi, Y.R. Hong, S.Y. & Choi, H.S., 2000. An Analysis of Second-Order Wave Forces on Floating Bodies by using a Higher-Order Boundary Element Method. *Ocean Engineering*, 28, pp.117–138.
- Faltinsen, O.M. Minsaas, K.J. Liapis, N. & Skjørdal, S.O., 1980. Prediction of Resistance and propulsion of a ship in a seaway. *Proceeding of 13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, Japan, 6–10 October 1980.
- Fonseca, N. & Soares, C.G., 2004. Experimental Investigation of the Nonlinear Effects on the Vertical Motions and Loads of a Containership in Regular Waves. *Journal of Ship Research*, 48(2), pp.118–147.
- Fujii, H. & Takahashi, T., 1975. Experimental study on the resistance increase of a ship in regular oblique waves. *Proceeding of the 14th International Towing Tank Conference*, Ottawa, September 1975.
- Hu, C. & Kashiwagi, M., 2007. Numerical and experimental studies on three-dimensional water on deck with a modified wigley model. *9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, Ann Arbor, Michigan, 5–8 August 2007.
- Joncquez, S.A.G., 2009. Second-Order Forces and Moments Acting on Ships in Waves. PhD Thesis, Technical University of Denmark.
- Kashiwagi, M. Takehiro, I. & Takuma, S., 2009. Effect of forward speed of a ship on added resistance in waves. *Proceeding of 19th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, 21–26 June 2009.
- Kim, K.H. & Kim, Y., 2010. Numerical Analysis of Added Resistance on Ships by a Time-Domain Rankine Panel Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(3), pp.398–409.
- Kim, K.H. & Kim, Y., 2011. Numerical Study on Added Resistance of Ships by using a Time-Domain Rankine Panel Method. *Ocean Engineering*, 38, pp.1357–1367.
- Kuroda, M. Tsujimoto, M. Fujiwara, T. Ohmatsu, S. & Takagi, K., 2008. Investigation on Components of Added Resistance in Short Waves. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 8, pp.171–176.
- Lee, J.H. Seo, M.G. Park, D.M. Yang, K.K. Kim, K.H. & Kim, Y., 2013. Study on the effects of hull form on added resistance. *Proceeding of the 12th international symposium on practical design of ships and other floating structures*, Changwon, Korea, 21–25 October 2013.
- Maruo, H., 1960. The Drift of a Body Floating on Waves. *Journal of Ship Research*, 4(3), pp.1–10.
- Nakamura, S. & Naito, S., 1977. Propulsive Performance of a Containership in Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 15, pp.24–48.
- Orihara, H. & Miyata, H., 2003. Evaluation of Added Resistance in Regular Incident Waves by Computational Fluid Dynamics Motion Simulation using an Overlapping Grid System. *Journal of Marine Science and Technology*, 8(2), pp.47–60.
- Sadat-Hosseini, H. Wu, P.C. Carrica, P.M. Kim, H. Toda, Y. & Stern, F., 2013. CFD Verification and

- Validation of Added Resistance and Motions of KVLCC2 with Fixed and Free Surge in Short and Long Head Waves. *Ocean Engineering*, 59, pp.240–273.
- Seo, M.G. Kim, K.H. Park, D.M. & Kim, Y., 2013. Comparative Study on Added Resistance for Different Hull Forms by using Weakly–Nonlinear Seakeeping Formulations. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(1), pp.49–58.
- Storm–Tejsen, J. Yeh, H.Y.H. & Moran, D.D., 1973. Added Resistance in Waves. *Transactions – The Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 81, pp.250–279.
- Tsujimoto, M. Shibata, K. Kuroda, M. & Takagi, K., 2008. A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 8, pp.141–146.
- Visonneau, M. Queutey, P. Leroyer, A. Deng, G.B. & Guilmineau, E., 2008. Ship motions in moderate and steep waves with an interface capturing method. *8th International Conference on Hydrodynamics*, Nantes, France, 30 September–3 October 2008.
- Xiao, F. Honma, Y. & Kono, T., 2005. A Simple Algebraic Interface Capturing Scheme Using Hyperbolic Tangent Function. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 48(9), pp.1023–1040.
- Yang, K.K. Nam, B.W. Lee, J.H. & Kim, Y., 2012. Analysis of Large–Amplitude Ship Motions using a Cartesian–Grid–based Computational Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(6), pp.461–468.
- Yang, K.K. Lee, J.H. Nam, B.W. & Kim, Y., 2013. Analysis of Added Resistance using a Cartesian–Grid–based Computational Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(2), pp.79–87.
- Yokoi, K., 2007. Efficient Implementation of THINC Scheme: A Simple and Practical Smoothed VOF Algorithm. *Journal of Computational Physics*, 226(2), pp.1985–2002.

