선박의 파랑 중 부가저항에 대한 실험과 수치계산의 비교 연구

박동민·서민국·이재훈·양경규·김용환[†]
서울대학교 조선해양공학과

Systematic Experimental and Numerical Analyses on Added Resistance in Waves

Dong-Min Park · Min-Guk Seo · Jaehoon Lee · Kyung-Kyu Yang · Yonghwan Kim[†]
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.

This paper considers experimental and numerical studies on added resistance in waves. As the numerical methods, three different methods, strip method, Rankine panel method and Cartesian-grid method, are applied. The computational results of vertical motion response and added resistance are compared with the experimental data of Series 60($C_b=0.8$) hull, S175 containership and KVLCC2 hull. To investigate the influence of above-still water hull form, a Rankine panel method is extended to two nonlinear methods: weakly-nonlinear and weak-scatterer approaches. As nonlinear computational models, three ships are considered: original KVLCC2 hull, 'Ax-bow' and 'Leadage-bow' hulls. Two of the three models are modified hull forms of original KVLCC2 hull, aiming the reduction of added resistance. The nonlinear computational results are compared with linear results, and the improvement of computational result is discussed. As experimental approach, a series of towing-tank experiment for ship motions and added resistance on the three models (original KVLCC2 hull, 'Ax-bow' and 'Leadage-bow') are carried out. For the original KVLCC2 hull, uncertainty analysis in the measurement of vertical motion response and added resistance is performed in three waves conditions: $\lambda/L=0.5, 1.1, 2.0$. From the experimental results, the effects of hull form on added resistance are discussed.

Keywords : Added resistance(부가저항), EEDI(선박연비제조지수), Greenship(그린쉽), Strip method(스트립법), Rankine panel method(랜킨패널법), Cartesian-grid method(직교격자법)

1. 서론

국제적으로 친환경에 대한 관심이 증가하고, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)가 선박의 온실가스 배출을 규제하기 위해서 2013년부터 선박연비제조지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 도입하면서 조선 및 해운업계에서는 선박의 운항 효율이 주요 관심사가 되었다. 선박의 운항 효율을 향상시키기 위한 많은 방법 중에 하나로 파랑 중 저항을 감소시키는 방법이 고려되고 있다. 부가저항이란 선박이 실제 해상에서 운항하는 경우 바람이나 파랑에 의해 정수 중 저항보다 증가하는 저항을 말하며, 이러한 부가저항은 선박에 따라서 정수 중에서 운항하는 경우의 저항보다 15~30%까지 커지는 경우도 있다. 따라서 부가저항을 정확히 예측하고 이를 효과적으로 감소시키고자 하는 연구들이 수행되고 있다.

본 논문에서는 최근 수행되었던 부가저항의 예측을 위한 수조 실험 및 수치계산 기법에 대한 연구들에 대하여 체계적으로 살펴보고, 그 결과들을 비교하여 여러 기법들에 대한 검증과 장단점, 그리고 실선 적용에 대한 활용성 등을 다루고자 한다.

파랑 중 부가저항의 추정을 위해 실험 및 수치적 연구는 1970~1980년대에 많이 수행이 되었으나 한동안 주목을 받지 못하다가 최근 그린쉽에 대한 관심이 고조되며 근래들어 여러 연구들이 수행되고 있다. 부가저항의 초기 연구는 실험에 기반하여 진행되었다. 부가저항 실험은 1970년대부터 Series 60 선형(Gerritsma & Beukelman, 1972; Storm-Tejse, et al., 1973), S175 컨테이너선 모델(Fujii & Takahashi, 1975; Nakamura & Naito, 1977), Wigley 모델(Journee, 1992) 등에 대한 연구가 진행되었다. 최근 Kuroda, et al. (2011)은 컨테이너선 기본선형을 기준으로 선수부의 형상을 다양하게 변화시켜가면서 이에 따른 부가저항 변화를 살펴보았다. 또한, Lee, et al. (2013)도 최

근 KVLCC2를 대상으로 한 선수형상의 변화에 따른 부가저항 실험을 수행하고 계측값과 수치계산결과를 비교한 바 있다. 기존의 실험적 연구를 살펴보면, 실험 기관에 따라서 실험 방법의 차이가 존재하며 동일한 조건의 실험에서도 부가저항 값이 많이 분산되어 있다. 그러나 부가저항 실험 값의 신뢰도를 파악할 수 있는 실험의 불확실성에 대한 연구는 거의 없다가 최근 Park, et al. (2014)에 의해 체계적 연구가 제시된 바 있다.

부가저항에서 점성의 영향은 미미하기 때문에 부가저항의 수치적인 연구는 포텐셜 이론에 기반하여 연구가 많이 진행되었다. 부가저항의 수치적 접근법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 두 가지 방법은 모멘텀 보존방법(far-field momentum method)과 압력직접 적분방법(near-field pressure integration method)이다. 모멘텀 보존방법은 Maruo (1960)에 의해서 제안되었으며, 다른 기법들에 비해 상대적으로 간단하게 계산 할 수 있어서 많이 사용되어 왔다. 부가저항을 계산하는 다른 주된 방법인 압력직접 적분방법은 물체 표면의 2차 동유체 압력을 계산하여 적분하는 방법으로, 모멘텀 보존방법에 비해서 계산 과정이 좀 더 복잡하지만 부가저항 식의 물리적 해석이 용이하며, 다중 물체 문제나 비선형 문제로의 확장이 수월하다는 장점이 있다. Faltinsen, et al. (1980)은 이 방법을 사용하여 부가저항을 계산하였으며, 선박운동 문제를 계산하기 위해서 스트립 방법을 적용하였다. 이외에도 Chun (1992), Choi, et al. (2000), Fang and Chen (2006)이 주파수 영역에서의 그린함수법(green function method)을 적용한 압력직접 적분방법을 사용하여 부가저항 해석을 수행한 바 있다. 최근에 Joncquez (2009)는 시간 영역에서 고차의 랜킨패널법을 이용하여 부가저항을 계산한 바 있다. 또한 Kim and Kim (2010; 2011), Kim, et al. (2012)은 부가저항을 해석하기 위해서 랜킨패널법을 압력직접 적분방법과 모멘텀 보존방법에 모두 적용하였으며, 선형 속도포텐셜과 그 미분 값을 구하기 위해서 Neumann-Kelvin 및 이중물체(double-body) 선형화 방법을 적용하여 각각의 결과를 실험값과 비교하였다. 그리고 시간영역 해법에서 불규칙 파의 부가저항을 해석하여 불규칙 파에서의 부가저항 해석을 위한 기준을 제시한 바 있다. CFD를 이용한 부가저항의 추정치는 아직 많은 연구가 이루어지지 않았다. Orihara and Miyata (2003)는 SR-108 컨테이너선에 대한 부가저항을 WISDAM-X라는 프로그램을 이용하여 해석하였으며, Visonneau, et al. (2008)은 ISIS-CFD라는 프로그램을 이용하여 선박의 부가저항을 해석하였다.

파장이 짧은 파가 선박에 입사되는 경우는 선박의 운동이 거의 없기 때문에 선박에 의해 생성되는 파는 반사파가 지배적이 되며, 기존의 방법으로 계산된 부가저항 값이 실제보다 작게 예측되는 경향이 있다. 이러한 점을 보완하고자 단파장에서의 부가저항을 추정하는 방법이 연구되어 왔다. Fujii and Takahashi (1975)는 고정된 수직의 원기둥에 가해지는 표류력에 대한 식을 선박에 적용할 수 있도록 몇 가지 가정을 통하여 단파장 영역에서 부가저항을 추정하였다. Faltinsen, et al. (1980)은 단파장 영역에서 파가 입사하는 경우 선박의 운동은 없으며, 파에 노출된 영역에서는 완전반사가 발생한다고 가정하여 점근식을 유도하였

다. Kwon (1987)은 Fujii and Takahashi (1975)가 제안한 식과 개념적으로 유사하지만, 모든 사파(oblique wave)에 적용이 가능하며, 물리적으로 좀 더 명확한 의미를 가지는 보정계수를 도입하여 단파장에서의 부가저항을 계산하는 식을 제시하였다. 최근 단파장에 대한 여러 기법들을 비교하는 연구결과가 Seo, et al. (2014)에 의해 체계적으로 정리되어 소개된 바 있다.

정확한 부가저항 계산을 위한 연구뿐만 아니라 부가저항을 감소시키기 위한 연구들도 활발하게 진행되고 있다. 파랑중 부가저항을 감소시키려는 연구는 선수부의 형상을 변화시키는 것과 선수부에 부가물을 부착하는 방향으로 진행되고 있다. 대표적인 선수부 형상 변형은 일본에서 제안된 Ax-bow와 Leadge bow가 있다. Ax-bow는 흘수선 위쪽 선수부 형상을 날카롭게 변형하여, 선박 전방으로의 파의 반사를 완화하는 파랑 중 부가저항을 저감하는 장치이다. Leadge bow는 Ax-bow와 유사한 개념의 장치이며, 흘수선 위쪽뿐만 아니라 아래쪽의 형상 또한 전방으로 날카롭게 만든 점이 차이점이라고 할 수 있다. 이러한 부가저항 저감 장치의 효과를 계산하기 위해서는 기존의 선형 해석으로는 불가능하며, 흘수선 위쪽의 형상을 고려할 수 있는 비선형 해석이 필요하다. 이를 위해서 Kihara, et al. (2005)는 2차원 비선형 경계 조건 문제를 풀었으며, 2차원의 비선형 해를 스트립법에 적용하여 선박의 운동 및 부가저항을 계산하여 흘수선 위쪽 형상 변화의 영향을 고려하였다. Kuroda, et al. (2011)는 선박의 수선면 변화를 적용하여 선박의 선수부 형상을 고려할 수 있는 경험식을 제안하였다. 이상의 연구 외에 선박의 흘수선 위의 형상 변화를 고려하여 부가저항을 해석한 연구는 많지 않다.

본 연구에서 부가저항의 해석은 스트립법, 랜킨패널법 (Seo, et al., 2013), 직교격자법 (Yang, et al., 2012)을 이용하여 Series 60 ($C_b=0.8$), S175 컨테이너선, KVLCC2 선박에 대해서 수행하였으며 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 수선면 위쪽의 형상을 반영하기 위해서 랜킨패널법은 비선형계산(weakly-nonlinear, weak-scatterer)으로 확장하였다. 이를 이용하여 선박해양플랜트 연구소(KRISO)에서 제공된 세 가지 선형(original KVLCC2, Ax-bow, Leadge-bow)에 대해서 부가저항을 추정하였으며 그 결과를 선형 해석 결과와 비교하였다. 부가저항 해석의 실험적 접근으로 세 가지 선형(original KVLCC2, Ax-bow, Leadge-bow)에 대해서 부가저항 실험을 진행하였다. 특히, original KVLCC2 선형에 대해서 수직동요응답과 부가저항의 불확실성 해석을 수행하여 부가저항 실험의 신뢰도를 파악하였다.

2. 수치해석 배경이론

본 연구에서는 선박의 운동 및 부가저항을 수치적으로 해석하기 위해서 스트립법(strip method), 랜킨패널법(rankine panel method) 및 직교격자법(cartesian grid method)의 세가지 다른 방법을 적용한다. 이를 위하여 입사파가 존재하는 무한수심의 자유표면상을 일정한 전진속도 U 로 진행하고 있는 선박에 대해서 Fig. 1과 같이 정의되는 물체 고정 좌표계를 도입하였다. 선박으

로 입사하는 파는 규칙파이며, A , ω 는 입사파의 진폭과 주파수를 나타내며, β 는 입사각을 의미한다. S_B 와 S_F 는 물체표면과 자유표면을 나타낸다. 선박의 운동은 평균위치에서 정의되며, 선박은 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 ship motion problem

2.1 스트립법(strip method)

대상 선형이 세장선이며, 낮은 전진속도와 높은 조우주파수를 가지는 경우 Fig. 2(a)와 같이 3차원 선박 문제를 2차원 단면 문제로 근사하여 선박의 운동해석을 수행할 수 있다. 선박운동을 해석하기 위해서 비압축성, 비점성 유체, 비회전 유동을 가정하면 속도포텐셜, ϕ , 를 도입할 수 있으며 선박의 단면에 대해서 2차원 경계조건 문제는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \phi_k = 0, (k = 2, 3, 4) \quad \text{in a fluid domain} \quad (1)$$

$$-\omega_e^2 \phi_k + g \frac{\partial \phi_k}{\partial z} = 0, (k = 2, 3, 4) \quad \text{on } z = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n} = V_n, (k = 2, 3, 4) \quad \text{on } S_b \quad (3)$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \nabla \phi_k = 0, (k = 2, 3, 4) \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 속도포텐셜, ω_e , V_n 및 g 는 각각 조우주파수, 물체 표면의 법선 속도 및 중력 가속도를 의미한다. 위의 경계치 문제는 물체 단면에 2차원 파랑 그린 함수(2D wave green function)를 분포함으로써 구할 수 있으며, 파랑 그린 함수의 수치적인 계산을 위해서 NIIRID (Sclavounos, 1985)를 적용하였다. 2차원 경계치 문제로부터 구한 유체동역학 계수 및 파강제력을 3차원 선박으로 확장하기 위해서 STF 스트립 이론 (Salvesen, et al., 1970)을 이용하였다.

(a) Strip method

(b) Rankine panel method

(c) Cartesian grid method

Fig. 2 Example meshes for three numerical methods

선박이 중심선(center line)에 대해서 대칭인 경우에 선박의 운동 방정식은 수직방향 운동 (전후동요, 상하동요, 종동요)과 수평방향 운동 (좌우동요, 횡동요, 선수동요)으로 나눌 수 있으며, 세장선의 경우에는 전후동요 운동이 다른 운동에 미치는 영향이 작기 때문에 수직방향 운동에서 상하동요와 종동요만을 고려하게 된다. 주파수 영역에서의 상하동요-종동요 연성 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{k=3,5} [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\xi}_k + B_{jk}\dot{\xi}_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t} \quad (j = 3, 5) \quad (5)$$

M_{jk} 는 선박의 질량과 관성모멘트를 의미하며, A_{jk} 및 B_{jk} 는 선박의 부가질량과 파랑감쇠계수를 나타낸다. C_{jk} 및 F_j 는 선박의 복원력과 파랑기진력을 의미한다.

스트립법을 사용하여 부가저항을 계산하기 위해서 far-field 방법인 모멘텀 보존법을 적용하였다. 모멘텀 보존법칙을 이용한 부가저항의 추정은 Maruo (1960)가 적용한 이후 현재까지 부가저항을 추정하는 방법으로 많이 사용되고 있다. 모멘텀 보존법칙을 이용한 부가저항은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$R = 4\pi\rho \left[-\int_{-\infty}^{-K'} + \int_{-K}^{\infty} \right] \times \frac{(m + \omega_e/U)^2 (m + K)}{\sqrt{(m + \omega_e/U)^4 - K_0^2 m^2}} |H(m)|^2 dm \quad (6)$$

$$\omega_e = \sqrt{gK} + KU \quad (7)$$

$$K_0 = \frac{g}{U^2}, \Omega = \omega_e \frac{U}{g}$$

$$K = \frac{1}{2} K_0 (1 + 2\Omega - \sqrt{1 + 4\Omega})$$

$$K' = \frac{1}{2} K_0 (1 + 2\Omega + \sqrt{1 + 4\Omega})$$

여기서 k 는 파수(wave number)이며, $H(m)$ 는 아래의 식과 같이 정의되는 Kochin 함수이다.

$$H_j(m) = \iint \left(\frac{\partial \varphi_j}{\partial n} - \varphi_j \frac{\partial}{\partial n} \right) e^{mz - imy \sin \beta - imx \cos \beta} dS \quad (8)$$

$$j = 1, \dots, 6$$

여기서 φ 는 물체 경계조건을 만족하는 속도포텐셜이다.

위의 식 (6)을 주파수가 높다는 가정에서 간략하게 정리하면 (Maruo & Ishii, 1976), 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = 4\pi\rho \int_{-\infty}^{\infty} (m + K) |H(m)|^2 dm \quad (9)$$

$$R = 8\pi^2\rho \int_{-\infty}^{\infty} \left[K |H(x)|^2 + i \overline{H(x)} \frac{dH(x)}{dx} \right] dx \quad (10)$$

식 (9)는 푸리에 변환(fourier transform)을 이용하면 식 (10)으로 정리될 수 있으며, 식 (10)을 이용하여 부가저항을 계산하였다.

2.2 랭킨패널법 (Rankine panel method)

2.2.1 선형 운동 및 부가저항 해석 기법

선박운동을 해석하기 위해서 비압축성, 비점성 유체, 비회전

유동을 가정하면 속도포텐셜, ϕ , 를 도입할 수 있으며, 속도포텐셜은 유체장과 경계면에서 각각 다음과 같은 라플라스 방정식과 경계조건을 만족한다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in fluid domain} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \vec{U} \cdot \vec{n} + \frac{\partial \delta}{\partial t} \cdot \vec{n} \quad \text{on } S_B \quad (12)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \phi) \cdot \nabla \right] [z - \zeta(x, y, t)] = 0 \quad \text{on } z = \zeta(x, y, t) \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \vec{U} \cdot \nabla \right) \phi = -g\zeta - \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad \text{on } z = \zeta(x, y, t) \quad (14)$$

$\delta (= \xi_T + \xi_R \times x)$ 는 임의의 지점에서의 선박의 변위를 나타내며, ζ 는 파고(wave elevation)를 의미한다. 위의 경계 조건 문제를 선형화하기 위해서 속도포텐셜과 파고를 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \phi(\vec{x}, t) &= \Phi(\vec{x}) + \phi_I(\vec{x}, t) + \phi_d(\vec{x}, t) \\ \zeta(\vec{x}, t) &= \zeta_I(\vec{x}, t) + \zeta_d(\vec{x}, t) \end{aligned} \quad (15)$$

Φ 는 기본 포텐셜을 나타내며, 아래첨자 I 는 입사파와 관련된 성분을, 아래첨자 d 는 교란파와 관련된 성분을 의미한다. Neumann-Kelvin 선형화 방법을 적용하는 경우 기본 포텐셜 Φ 는 균일류 포텐셜 ($-Ux$)이 되며, double body 선형화 방법을 적용하는 경우에는 $z = 0$ 을 대칭으로 이미지 물체를 두어 무한 유체장에서 $\partial \Phi / \partial n = U \cdot n$ 을 만족하는 경계조건 문제를 풀어 Φ 를 계산한다. 선형화된 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial n} = \sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial t} n_j + \xi_j m_j \right) - \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{on } \overline{S_B} \quad (16)$$

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

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla \right] \zeta_d \\ = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \zeta_d + \frac{\partial \phi_d}{\partial z} - \nabla \Phi \cdot \nabla \zeta_I \quad \text{on } z = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla \right] \phi_d &= -g\zeta_d - \nabla \Phi \cdot \nabla \phi_I \\ &+ \left[\vec{U} \cdot \nabla \Phi - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \frac{1}{2} \nabla \Phi \right] \quad \text{on } z = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $\overline{S_B}$ 는 선박의 평균위치에서의 입수면을 의미한다. 선박이 강체인 경우에 운동방정식은 아래와 같이 적용된다.

$$[M_{jk}] \ddot{\xi}_k = F_{F.K.j} + F_{H.D.j} + F_{Res.j} \quad (19)$$

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.

선형화된 경계조건 문제를 풀기 위해서 경계면을 Fig. 2(b)와 같이 이산화 하여 3차원 랜킨소스를 선박의 표면과 자유표면에 분포하였으며, 이산화된 경계면에서의 물리적 변수 값 (속도포텐셜, 속도포텐셜의 법선 방향 미분 값, 파고)은 비스플라인 함수 (B-spline function)로 가정한 고차의 패널법을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 수치해석 기법에 대한 자세한 내용은 Seo, et al. (2013)에서 확인할 수 있다.

본 연구에서는 랜킨패널법을 사용하여 부가저항을 해석하기 위해서 압력직접분법을 도입하였으며, 압력직접분법을 적용한 부가저항 계산식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{F}_2 = & \int_{WL} \frac{1}{2} \rho g (\zeta - (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x))^2 \cdot \vec{n} dL \\ & - \rho \int_{WL} \left(-(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) (\zeta - (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x)) \cdot \vec{n}_1 dL \\ & - \rho \int_{WL} \vec{\delta} \cdot \nabla \left(-(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) (\zeta - (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x)) \cdot \vec{n} dL \\ & - \rho \iint_{\overline{S_B}} g z \cdot \vec{n}_2 ds - \rho \iint_{\overline{S_B}} \frac{1}{2} (\nabla(\phi_I + \phi_d) \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d)) \cdot \vec{n} ds \\ & - \rho \iint_{\overline{S_B}} \left(g(\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x) + \frac{\partial(\phi_I + \phi_d)}{\partial t} \right) \cdot \vec{n}_1 ds \\ & \quad - (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d) \\ & - \rho \iint_{\overline{S_B}} \vec{\delta} \cdot \nabla \left(\frac{\partial(\phi_I + \phi_d)}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d) \right) \cdot \vec{n} ds \\ & - \rho \iint_{\overline{S_B}} \left[\left(-(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) \cdot \vec{n}_2 \right] ds \\ & \quad - \rho \iint_{\overline{S_B}} \vec{\delta} \cdot \nabla \left(-(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) \cdot \vec{n}_1 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\vec{n}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\xi_6 & \xi_5 \\ \xi_6 & 0 & -\xi_4 \\ -\xi_5 & \xi_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{Bmatrix}, \quad (21)$$

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

여기에서 적분구간 WL과 $\overline{S_B}$ 는 각각 수선과 평균위치에서의 입수면을 의미하며, n은 선박의 법선 벡터이며 n_1 , n_2 는 각각 1차, 2차 법선 벡터를 나타낸다. 본 연구에서 적용한 위의 식의 경우 선형해로부터 구해지는 2차 평균값을 통해서 부가저항 값을 계산한다.

2.2.2 비선형 운동 및 부가저항 해석 기법

선박 운동 문제에서 비선형성에 대한 요인은 크게 자유표면의 비선형성과 물체 형상의 비선형성으로 나눌 수 있다. 물체 형상이 갖는 비선형성은 대체로 자유표면이 갖는 비선형성에 비하여 그 적용이 간단하기 때문에 최근에 선박 운동 문제 해석에서 많이 고려되고 있다. 특히 Froude-Krylov 힘과 복원력을 선박의 실제 입수면에서 계산하여 선박의 비선형 운동을 해석하는 방법이 많이 적용되고 있으며, 이를 일반적으로 weakly-nonlinear 해석이라고 부른다.

Table 1 Consideration of body nonlinearity

	Linear computation	Weakly-nonlinear computation	Weak-scatter computation
Froude-Krylov & restoring force
Hydrodynamic force
Numerical implementation	Easy	Easy	Hard
Computational cost	Medium	Medium	Very High

Weakly-nonlinear 해석 방법보다 선박 입수면의 변화로 인한 비선형성을 좀 더 고려하는 해석 방법으로 weak-scatterer 가정에 근거한 해석 방법이 있다. 이는 Froude-Krylov 힘과 복원력뿐만 아니라 선박에 의해 산란되는 유체 동역학적 힘까지 입사파를 고려한 실제 입수면에 대해 계산하는 방법이다. 이 방법은 매시간 선박의 실제 위치를 고려하여 입사파에 의한 선박의 입수면 및 자유표면에 격자를 생성하고, 그에 따른 경계조건 문제를 해석하는 방법으로, weakly-nonlinear 해석 방법에 비하여 많은 해석 시간이 소요되지만 선박 입수면에 의한 비선형성을 좀 더 반영할 수 있다. 이상에서 설명한 선박의 비선형성을 고려하는 방법의 단계를 Table 1에 정리하였다.

Weakly-nonlinear 해석 기법에서는 복원력 및 Froude-Krylov 힘은 실제 입수면적에서 계산하는 반면, 유체동역학적 힘의 경우 선형 해석 기법과 동일하게 평균 입수면적에 대해서 계산한다. 비선형 복원력과 Froude-Krylov 힘은 다음과 같다.

$$\{F_{Res, WN}\} = \int_{S_B} \rho g(-z) \cdot \vec{n} dS - \int_{S_B} \rho g(-z) \cdot \vec{n} dS \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \{F_{F.K., WN}\} = & \rho \int_{S_B} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \vec{U} \cdot \nabla \right) \phi_I + \frac{1}{2} \nabla \phi_I \cdot \nabla \phi_I \right\} \cdot \vec{n} dS \\ & + \rho \int_{S_B} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \vec{U} \cdot \nabla \right) \phi_I + \frac{1}{2} \nabla \phi_I \cdot \nabla \phi_I \right\} \cdot \vec{n} dS \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 $\bar{S}_B$ 와 S_B 는 각각 선박의 평균위치에서의 입수면 및 실제 위치에서의 입수면을 의미하며, $\vec{n}$ 은 선박의 실제위치에서의 법선방향 벡터를 의미한다. 이는 선박의 위치를 실제 위치로 Euler 변환한 뒤 계산할 수 있다. Weakly-nonlinear 해석 기법에서 입력직접적분법을 사용하여 부가저항을 계산하기 위해서는 비선형 복원력 및 Froude-Krylov 힘에 의한 영향을 고려해 주어야 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{WN} = R_{ar} + [\{F_{Res, WN}\} + \{F_{F.K., WN}\}] - \frac{\rho g}{2} \int_{WL} (\zeta_I - (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x))^2 \cdot \vec{n} dL \quad (24)$$

Weak-scatterer 가정은 선박이 세장체(slender body)인 경우에 선박에 의해 산란되는 파가 입사파에 비해 작다고 가정한다. ($\zeta_i \gg \zeta_d$) Weak-scatterer의 가정법에서는 산란파 포텐셜과 파고는 앞의 방법과 동일하게 $O(\epsilon)$ 로 정의하는 반면, 입사파 포텐셜과 파고를 $O(1)$ 로 정의한다. 따라서 자유표면 경계조건이 $z = 0$ 에서 만족하는 선형 해석법과는 달리 weak-scatterer 방법에서는 자유표면 경계 조건이 $z = \zeta_i$ 에서 만족하므로 매시간마다 입사파에 의해 정의되는 자유표면 격자를 생성해 주고 이에 대해 다음과 같은 경계조건을 $z = \zeta_i$ 에서 적용해 주어야 한다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \Phi - \nabla \phi_I - \nabla \phi_d) \cdot \nabla \right] \zeta_d \\ &= - \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \Phi - \nabla \phi_I - \nabla \phi_d) \cdot \nabla \right] \zeta_I \\ &+ \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \phi_I}{\partial z} + \frac{\partial \phi_d}{\partial z} \\ &+ \zeta_d \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \nabla \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \phi_I}{\partial z} \right) \cdot \nabla \zeta_I \right] \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \Phi - \nabla \phi_I) \cdot \nabla \right] \phi_d \\ &= - \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \Phi - \nabla \phi_I) \cdot \nabla \right] \phi_I + \frac{1}{2} \nabla \phi_I \cdot \nabla \phi_I \\ &- \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla \right] \Phi + \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi \\ &- g(\zeta_I + \zeta_d) - \zeta_d \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \Phi - \nabla \phi_I) \cdot \nabla \right] \frac{\partial \phi_I}{\partial z} \end{aligned} \quad (26)$$

하중을 계산하기 위해서 베르누이 방정식에 전체 포텐셜을 넣어 1차 항까지 정리한 뒤 이를 물체 표면에 대해서 적분하면 다음과 같이 Froude-Krylov 힘과 유체 동역학적 힘을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{F_{FK}\} &= -\rho \int_{S_B} \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \Phi - \nabla \phi_I) \cdot \nabla \right] \phi_I \right\} \cdot \vec{n} dS \\ &+ \int_{S_B} \left(\frac{1}{2} \nabla \phi_I \cdot \nabla \phi_I \right) \cdot \vec{n} dS \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \{F_{HD}\} &= \rho \int_{S_B} \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \Phi - \nabla \phi_I) \cdot \nabla \right] \phi_d \right\} \cdot \vec{n} dS \\ &- \rho \int_{S_B} \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla \right] \Phi - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi \right\} \cdot \vec{n} dS \end{aligned} \quad (28)$$

Weak-scatterer 운동해석 기법을 사용한 경우 부가저항은 파랑 중에서의 x방향 평균 힘에서 정수 중에서의 x방향 힘을 뺀 값으로 계산한다. Weakly-nonlinear와 weak-scatterer 방법에 대한 자세한 내용은 Seo, et al. (2013)에서 확인할 수 있다.

2.3 직교격자법

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

$$\int_{\Gamma} (\vec{u} \cdot \vec{n}) = 0 \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} dV &= - \int_{\Gamma} \vec{u} (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS \\ &- \frac{1}{\rho} \left[\int_{\Gamma} p \vec{n} dS - \int_{\Omega} \vec{f}_b dV \right] \end{aligned} \quad (30)$$

여기서 Ω 는 전체 영역을 의미하고 Γ 는 영역의 경계를 나타낸다. 속도와 압력의 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-CGSTAB 기법을 이용하였다. 또한, 대류 항의 공간에 대한 이산화는 벽면에서의 플렉스를 통해 이루어지며, monotone central 제한자(limiter)를 이용하여 셀 벽면에서의 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 부가저항을 계산하기 위하여 각 격자에서 서로 다른 물질이 차지하는 부피 비를 나타내는 스칼라 함수(γ_m , $m=1$: 물, $m=2$: 공기, $m=3$: 물체)를 정의하였다. γ_1 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. 본 기법에서는 각 물질의 부피 비를 이용하여 셀에서의 물리적인 밀도를 구하게 된다. 각 셀에서 물체에 대한 밀도 함수 값을 알고 있는 경우 다음 식을 이용하여 물체경계 조건을 만족시키게 된다 (Hu & Kashiwagi, 2007).

$$\vec{u}^{**} = \vec{u}^* (1 - \gamma_3^u) + \vec{U}_{body} \gamma_3^u \quad (31)$$

여기서 $\vec{U}_{body}$ 는 속도가 정의된 검사체적 중심에서 물체의 속도를 나타내고, γ_3^u 는 각 속도 검사체적에 대한 물체의 부피 비를 의미한다. 위 식을 사용하는 경우 물체경계 조건을 정확한 물체 표면에서 만족하지 않지만, 관성력이 지배적인 문제에는 정확한 결과를 제공한다.

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

$$\vec{F} = - \sum_{l=1}^{nFace} p_l \vec{n}_l \Delta S_l \quad (32)$$

$$\vec{M} = - \sum_{l=1}^{nFace} (\vec{x}_l^c - \vec{x}_{cg}) \times \vec{n}_l p_l \Delta S_l \quad (33)$$

여기서 $nFace$ 는 물체표면상에서 정의되는 전체 요소 개수를 의미하고, p , ΔS , $\vec{n}$ 은 각각 직교 격자로부터 구해진 선체 표면에서의 압력과 선체표면 요소의 면적 및 법선벡터를 의미한다. 아래첨자 l 은 각 선체표면 요소의 색인(index)을 의미하고 $\vec{x}^c$ 와 $\vec{x}_{cg}$ 는 각각 삼각형 중심 및 물체의 무게중심 좌표를 뜻한다. 수치기법에 대한 보다 자세한 내용은 Yang, et al. (2012)에서 찾을 수 있다.

직교격자법에서의 부가저항을 계산하기 위해서 물체 표면의 압력을 적분하는 방법을 적용하였으며, 파랑 중에서의 x방향 평균 힘에서 정수 중에서의 x방향 힘을 뺀 값으로 계산하였다.

2.4 단파장 영역 부가저항

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

Faltinsen, et al. (1980)은 부가저항에 대한 다음의 이론식을 유도하였다. 파장이 짧은 파가 입사하는 경우, 파에 노출된 영역에서는 완전반사가 발생한다고 가정하였다. 또한, 국부 정상 유동(local steady flow)에 대한 속도를 단순히 균일유동의 표면에 대한 접선 성분으로 가정하였고, 물체를 정수면에서 단면을 갖는 실린더 형상으로 생각하였다.

$$R = \frac{1}{2} \rho g \zeta_I^2 \int_L \left[\frac{2\omega U}{g} [1 + \cos\theta \cos(\theta - \beta)] \right] \vec{n} dL \quad (34)$$

$$n_1 = \sin\theta$$

$$n_2 = \cos\theta$$

$$n_6 = x_0 \cos\theta - y_0 \sin\theta$$

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

여기서 적분영역은 Fig. 3에서 표시된 바와 같이 파에 직접적으로 노출된 영역, A-F-B 구간이다.

다른 방법으로 단파장 영역에서의 부가저항에 대한 식을 Fujii and Takahashi (1975)가 유도한 바가 있다. 고정된 수직의 원기둥에 가해지는 표류력에 대한 식을 선박에 적용할 수 있도록 몇 가지 가정을 통하여 보정계수 ($\alpha_d, 1 + \alpha_U$)를 추가하였다. 최근에 일본의 National Maritime Research Institute(NMRI)에서는 Fujii and Takahashi (1975)의 식을 기본으로 하되, 여러 실험값을 사용하여 보정계수의 보완한 식을 제시하였다 (Tsujiimoto, et al., 2008, Kuroda, et al., 2008).

$$R = \alpha_d (1 + \alpha_U) \left[\frac{1}{2} \rho g \zeta_I^2 B B_f(\beta) \right]$$

$$B_f(\beta) = \frac{1}{B} \left[\int_{I+} \sin^2(\theta - \beta) \sin\theta dl + \int_{II} \sin^2(\theta + \beta) \sin\theta dl \right] \quad (35)$$

$$1 + \alpha_U = 1 + f(F_n)$$

$$\alpha_d = \frac{\pi^2 I^2(\chi)}{\pi^2 I_1^2(\chi) + K_1^2(\chi)}$$

Table 2 Coefficients of empirical formula

	$f(F_n)$	χ
Fujii and Takahashi (1975)	$5\sqrt{F_n}$	kd
NMRI	$F_n \times \max[10.0, -310B_f(\beta) + 68]$	$\omega_e^2 d / g$

NMRI의 보완점이라고 할 수 있는 부분은 반사계수에 대한 식을 전진속도를 고려한 파수(wave number)를 사용하였으며, 전진속도의 영향을 고려한 보정계수를 실험값을 반영한 식을 사용하여 날씬한 형상을 가진 선박에서도 좋은 결과를 보여 줄 수 있도록 수정한 점이다.

3. 모형시험

3.1 부가저항 모형시험 방법

ITTC 에서 제시하는 부가저항 시험 방법 (ITTC, 2011b)은 식 (36)과 같다.

$$R_A = \bar{R} - R_0 \quad (36)$$

여기서, R_A 는 파랑 중 부가저항, $\bar{R}$ 는 파랑 중 전저항의 시간평균, R_0 는 정수 중 저항값을 의미한다.

3.2 실험시설 및 장비

모형시험이 이루어진 서울대학교 선형수조는 길이 110m, 폭 8m, 깊이 3.5m의 콘크리트 벽 형태의 수조로서, 예인전차는 최대 속도 5m/s로 작동 가능하며 $0.01 \sim 0.5 \text{ m/s}^2$ 의 가속도를 가지고 있다. 수조의 한 쪽 면에는 plunger type의 조파기가 설치되어 있어서, 파고 0.002~0.5m의 파를 생성할 수 있다. 조파기로부터 11m 떨어진 위치에 초음파 파고계를 설치하여 생성된 파를 측정하였다. 파고계의 위치는 조파기에서 발생하는 국부파(local wave)가 충분히 소멸되어 영향을 미치지 않는 위치에 설치되었다. 수조의 측면 및 정면에 조파기가 설치되어 실험이 끝난 후에 효과적인 소파가 가능하며 이는 모형시험에서 실험 수행 중간에 대기 시간을 단축할 수 있다.

Fig. 4 Diagram for measuring device system

Fig. 4는 실험에 사용된 계측 장비의 구성도를 나타낸 것이다. 운동의 계측은 4자유도 운동계측장비를 이용하였으며 4자유도 중에서 횡동요 운동은 고정하고, 전후동요, 상하동요, 종동요를 계측하였다. 운동의 계측은 포텐서미터(potentiometer)를 이용하였다. 저항의 계측은 1분력 로드셀(load cell)을 이용하였다. 1분력 로드셀은 상하동요 봉(heave bar)와 종동요 짐벌(pitch gimbal) 사이에 설치되어 저항값을 계측하였다. 또한 모형선의 앞에 용량식 파고계를 설치하여 파를 계측하였다. 실험 데이터들은 필터의 적용 없이 200Hz로 계측하였으며 앰프 및 데이터 계측장비에서 자체적으로 사용하고 있는 필터는 없다.

3.3 모형시험의 불확실성

부가저항의 불확실성 연구는 정수 중 저항에 대한 불확실성 등과는 달리 파랑에 대한 변수들도 변화하고 선박의 운동성능에 대한 불확실성부터 관찰하여야 하는 어려움이 있어, 그동안 연구가 진행된 것이 거의 없는 상황이다. 다행스럽게도 부가저항 계측의 불확실성에 대한 체계적 연구가 대단히 최근 Park, et al.(2014)에 의해 소개된 바 있어, 이 연구를 통해 관찰된 내용들이 나름대로 향후 부가저항 실험에 대한 불확실성을 이해하는데 도움이 될 것으로 기대된다. Park, et al. (2014)는 부가저항 모형시험에 대해서 ITTC-Recommended Procedures and Guidelines (2011a)에 준하여 실험의 불확실성을 해석하였다. ITTC procedures는 ISO-GUM (International Organization for Standardization, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, ISO, 1995)를 실험의 불확실성을 해석하기 위한 방법으로 채택하고 있다.

부가저항 실험의 불확실성 해석에 영향을 미치는 요소들은 7가지로 분류할 수 있다. 첫 번째, 기본 측정장비의 불확실성이다. 실험에서 사용되는 장비들을 이용한 계측 값은 불확실성을 가지고 있으며 이 불확실성은 실험의 모든 값에 영향을 미친다. 두 번째, 모형선 형상의 불확실성이다. 실험에 사용된 모형선은 제작과정 및 시간의 경과에 따른 형상의 변형에 의해서 불확실성을 가질 수 있다. 이러한 모형선 형상의 불확실성은 선박의 배수량 및 접수표면적에 영향을 미쳐서 실험 결과에 영향을 미친다. 세 번째, 질량분포의 불확실성이다. 질량분포의 불확실성은 모형선의 무게중심의 높이와 관성반경을 맞추는 과정에서 발생하는 불확실성이다. 네 번째, 모형선 및 장비의 설치에서 발생하는 불확실성이다. 모형선을 설치, 파고계의 설치 등에서 불확실성이 발생하며 이 불확실성은 실험의 계측값에 직접적인 영향을 미친다. 다섯 번째, 측정장비의 교정(calibration) 과정에서 발생하는 불확실성이다. 교정은 측정의 전 과정에서 발생하는 불확실성을 포함하기 때문에, 측정장비의 불확실성과 설치에서 발생하는 불확실성을 일부 포함한다. 여섯 번째, 측정의 불확실성이다. 측정의 불확실성은 실험값의 계측부터 얻은 시계열에서 시계열의 진폭, 평균값, 위상 등을 얻는 과정에서 발생하는 불확실성이다. 마지막 불확실성 요소는 Data Reduction Equation(DRE)이다. 각각 측정된 값들은 DRE에 따라서 실험의 최종결과로 나타내어지는데, 각각의 불확실성이 DRE를 통해서 최종 실험의 불확실성으로 나타나게 된다. 이러한 7가지 요소에 대해서 불확실성 해석을 수행하여 요소들이 부가저항에 미치는 영향들은 Park, et al. (2014)의 연구에서 자세히 소개되고 있다.

4. 부가저항 해석 결과

4.1 부가저항 수치해석 기법의 정도 비교

본 장에서는 본 연구에서 고려한 세가지 다른 수치해석 기법인 스트립법, 랜킨패널법 및 직교격자 방법의 부가저항 계산 정

도를 비교하고자 한다. 대상 선형은 Series60 $C_B = 0.8$, S175 컨테이너선 및 KVLC2 선형으로 주요 제원은 아래의 Table 3과 같다. 부가저항은 선박의 운동응답과 밀접한 관련이 있으므로, 각각의 선박에 대한 운동 응답 계산 결과를 실험결과와 비교·검증한 후 규칙파에서의 부가저항 값을 계산하였다.

Table 3 Principal dimension of test models

Model	Series 60 ($C_B = 0.8$)	S175 containership	KVLC2
L (m)	121.92	175.0	320.0
B (m)	18.76	25.4	58.0
D (m)	7.5	9.5	20.8
C_B	0.8	0.561	0.8098
Displacement (m^3)	13,723	23,690	312,622

(a) Panel model for Rankine panel method

(b) Grid distribution for Cartesian grid method

Fig. 5 Examples of solution grid: S175 containership

Fig. 5는 랜킨패널법 및 직교격자법에서 사용된 패널 및 격자의 예를 보여주고 있다. 두 방법 모두 영역의 크기를 입사파 파장의 5배로 하였으며, 파의 감쇠를 위해서 입사파 파장의 2배 정도로 감쇠영역을 설정하였다. 랜킨패널법의 경우 패널의 개수는 물체의 형상과 자유표면의 크기에 따라서 달라지며, 대략 반쪽에 4,000~6,000개의 패널을 분포 시켜 사용하였다. 직교격자법에서는 대략 400만 ~ 500만개 (280×130×130)의 격자를 분포시켰으며, 선박 주변과 자유표면 영역에 격자를 조밀하게 주었다.

4.1.1 운동 응답 해석

부가저항은 회절(diffraction) 성분과 선박의 운동에 의한 (radiation) 성분으로 구성되어 있다. Fig. 6은 선수파에서 KVLC2선형의 부가저항 중 회절 성분과 선박의 운동에 의해서 발생하는 성분의 크기를 보여준다. x축은 무차원화 된 주파수와 파장을 나타내며 y축은 무차원화 된 부가저항 값을 나타낸다. 회절에 의한 성분은 단파장에서 부가저항의 대부분을 차지하며 선박의 운동에 의한 성분은 선박의 상대운동이 커지는 부분에서 부가저항의 큰 부분을 차지한다. 따라서 부가저항을 해석할 때 단파장 영역과 선박의 상대운동이 큰 부분은 서로 다른 관점에서 접근해야 한다.

Fig. 6 Components of added resistance: KVLC2, $Fn=0.142$, $\beta=180\text{deg}$.

Fig. 7은 S175 선형이 $Fn=0.25$ 으로 전진하는 경우의 수직운동응답을 나타낸 것이다. x 축은 무차원화된 파 주파수를 나타내며, y 축은 운동응답을 나타낸다. 파고에 따라서 운동응답의 비선형성이 존재하는 직교격자법의 계산에서 입사파의 파고는 $H/\lambda = 1/40$ 로 정하여 실험 조건과 동일한 조건을 유지하였다. 계산결과는 Fonseca and Soares (2004)의 실험결과와 비교하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 스트립법, 랜킨패널법, 직교격자법의 운동응답 결과는 실험결과와 유사한 경향을 가지는 것을 확인할 수 있다. 경향은 유사하지만 부분적으로 차이가 나는 부분을 살펴보면 상하동요응답의 최고값 부분에서 차이가 가장 크다. 스트립법의 결과는 상하동요응답 최고값의 주파수는 실험결과와 잘 일치하지만 최고값의 크기는 실험결과보다 크게 계산되었다. 랜킨패널법의 결과는 최고값의 주파수 및 크기 모두 실험결과와 유사하게 계산되었다. 직교격자법의 결과는 최고값의 주파수가 장파장 영역으로 이동한 곳에서 나타났다. 종동요응답의 결과는 세 가지 수치해석 방법 모두 상하동요응답의 결과보다 실험결과와 잘 일치하였다.

Fig. 7 Comparison of vertical motions: S175, $F_n=0.25$, $\beta=180^\circ$.

Fig. 8은 KVLCC2 선형이 $F_n=0.142$ 으로 전진하는 경우의 수직운동응답을 나타낸 것이다. 직교격자법의 계산에서 입사파의 파고는 $H/\lambda=1/40$ 로 고정하였으며, 파의 기울기가 일정한 값을 가지도록 하였다. 실험에서는 파고를 일정하게 유지하도록 고정하고 실험을 진행하였다. 실험결과는 전후동요를 고정한 경우와 허용한 경우에 대해서 결과를 나타내었다. 전후동요를 고정한 경우와 허용한 경우에 대해서 상하동요응답의 결과는 일치하였다.

Fig. 8 Comparison of vertical motions: KVLCC2, $F_n=0.142$, $\beta=180^\circ$.

상하동요응답의 계산 결과를 살펴보면, 스트립법, 랜킨패널법, 직교격자법의 운동응답이 실험결과와 유사한 것을 확인 할 수 있다. 앞에서 살펴본 S175의 상하동요응답에서 보였던 직교격자법의 최고값이 장파장 영역으로 이동한 것은 KVLCC2 선형에서도 동일하게 나타났다. 종동요응답은 전후동요를 고정한 경우와 허용한 경우에 대해서 다른 결과를 주었다. 장파장 영역에서 전후동요를 고정한 경우, 종동요응답이 더 크게 예측되었다. 이러한

종동요응답의 차이는 전후동요와 종동요의 연성항(coupling term)에 의해서 발생하는 것으로 보여진다. 계산결과를 살펴보면 스트립의 계산결과는 전후동요를 허용한 경우의 실험결과와 잘 일치하였다. 반면 랜킨패널법과 직교격자법의 결과는 전후동요를 고정한 실험결과와 유사한 경향을 보여주었다.

4.1.2 부가저항 해석

앞서 언급한 수치적 부가저항 추정방법의 부가저항 정도를 비교하기 위해서 Series60 $C_B = 0.8$, S175 컨테이너선을 대상으로 부가저항을 추정하였다. 스트립법, 랜킨패널법, 단파장 영역의 부가저항 추정은 두 가지 선형에 대해서 적용하였고, 직교격자법은 S175 선박에 대해서만 적용하였다.

Fig. 9 Added resistance on Series60 $C_B=0.8$, ($F_n=0.15$, $\beta=180\text{deg.}$)

스트립법, 랜킨패널법, 단파장 영역 부가저항 추정법을 사용하여 Series60 $C_B=0.8$ 에 대해서 부가저항을 해석하고 결과를 Fig. 9에 나타내었다. x,y 축은 각각 무차원화 된 파장과 부가저항 값을 나타낸다. 랜킨패널법은 선형해석의 결과를 나타낸 것으로 전반적인 경향은 실험결과와 유사한 것을 Fig. 9에서 알 수 있다. 단파장 영역에서 부가저항의 실험값은 넓은 범위에 분포되어 있는데, 단파장 영역에서 랜킨패널법의 부가저항 결과는 실험값의 작은 값과 비슷한 값으로 나타났다. 스트립법을 이용한 부가저항 추정 값은 단파장영역을 제외하고는 실험결과와 비슷한 경향을 보여주었다. 다만, 단파장영역에서 스트립법은 2차원 근사법의 한계로 아주 작은 값으로 추정되었다.

단파장 영역 부가저항 추정법의 결과를 살펴보면 Faltinsen 방법과 NMRI 방법은 유사한 경향을 보여주었다. Fujii and Takahashi 방법은 파장비가 0.5보다 작은 영역에서는 다른 두 가지 방법과 유사한 결과를 보여주었지만, 파장비가 0.5보다 큰 영역에서는 급격하게 감소하였다. 세 가지 단파장 영역에서 부가저항 추정법과 랜킨패널법의 단파장 영역 부가저항 추정은 단파

장 영역 부가저항 실험값의 가장 작은 실험값과 비슷한 경향을 보여주었다.

Fig. 10 Added resistance on S175, ($F_n=0.20$, $\beta=180\text{deg.}$)

Fig. 10은 스트립법, 랜킨패널법, 직교격자법, 단파장 영역 부가저항 추정법을 사용하여 S175 선박에 대해서 부가저항 해석 결과를 나타낸 것이다. 스트립법, 랜킨패널법은 단파장 영역을 제외하고 실험결과와 유사한 경향을 보여주었다. 부가저항의 최고값이 나타나는 부분에서 스트립법과 랜킨패널법은 실험결과보다 조금 큰 값으로 부가저항이 추정되었고, 직교격자법은 실험결과보다 조금 작은 값으로 추정되었다. 단파장 영역에서는 스트립법과 랜킨패널법은 실험결과보다 작은 값으로 예측되었다. 반면 직교격자법은 단파장 영역에서 실험결과와 유사한 부가저항 값을 보여주었다. 단파장 영역 부가저항 추정법의 결과를 보면 Faltinsen 방법과 Fujii and Takahashi 방법은 실험 결과보다 작은 값으로 추정되었고, NMRI 방법은 실험 결과와 유사한 결과를 보여주었다. 이러한 결과는 수선면 부근의 선형의 비선형성에서 기인한 것으로 보여진다. 해석 모델인 Series60 $C_B = 0.8$ 은 수선면 부근의 형상의 변화가 크지 않지만, S175 선형의 경우 수선면 부근의 형상의 변화가 크다. 형상의 변화 적은 Series60 $C_B = 0.8$ 에 대해서는 좋은 결과를 주지만, 형상의 변화가 큰 S175 컨테이너선의 경우는 좋지 않은 결과를 주었다. NMRI 방법은 실험 결과를 이용하여 선형의 비선형을 일정부분 반영하였기 때문에 형상의 변화가 큰 선형에 대해서도 비교적 좋은 결과를 주는 것으로 보여진다. 또한 직교격자법은 정수면 위쪽의 형상 변화를 직접 반영할 수 있기 때문에 형상의 변화가 큰 선형에 대해서도 좋은 결과를 주는 것으로 보여진다. 수선면 위의 형상의 변화가 단파장 영역의 부가저항에 미치는 영향에 대해서는 체계적인 연구가 필요하다.

앞에서 살펴본 수치적 부가저항 추정방법의 부가저항 정도를 비교해보면 스트립법은 단파장영역에서는 부가저항이 아주 작은 값으로 추정되는 것을 알 수 있다. 스트립법에 단파장 영역의 보

정법을 적용하는 경우 실험결과와 유사한 경향을 가지는 것을 알 수 있었다. 랜킨패널법을 이용한 선형적 부가저항의 추정치는 대체적으로 좋은 결과를 주는 것으로 보여진다. 다만 정수면 위쪽의 형상의 변화가 심한 선형의 경우 단파장 영역에서 부가저항이 작게 추정되는 것으로 보여진다. 직교격자법은 정수면 위쪽의 형상 변화를 직접 반영할 수 있기 때문에 정수면 위쪽의 형상 변화가 심한 선형에 대해서도 좋은 결과를 보여주었다. 단파장 영역의 부가저항 추정법 중에서 Faltinsen 방법과 Fujii and Tahahashi 방법은 정수면 위쪽의 형상 변화가 큰 선형에 대해서는 부가저항을 작게 추정하는 경향을 보여주었다. NMRI 방법은 정수면 위쪽의 형상의 변화가 큰 선형에 대해서도 비교적 좋은 결과를 보여주었다.

4.2 부가저항 실험의 불확실성 해석

실험에서 불확실성 해석은 실험으로 계측된 결과값의 불확실성을 파악하고 결과값의 신뢰성을 파악하는 것이다. 불확실성 해석은 KVLCC2 기본선형의 운동 응답과 부가저항에 대해서 수행하였으며 그 결과를 수치계산의 결과와 비교하였다. 이 결과는 이미 Park, et al. (2014)에 의해 소개된 바 있으나, 본 연구모델 중 하나인 KVLCC2 선형에 대한 연구를 수행한 결과임으로 하여, 본 논문에서 그 결과의 중요한 내용만 다시 소개한다.

4.2.1 운동 응답의 불확실성 해석

상하동요 및 종동요 운동은 식 (37)~(38)과 같이 무차원화 하였으며, 불확실성 추정을 위한 combined uncertainty는 식 (39), (40)로부터 얻을 수 있다.

$$\xi_3' = \frac{\xi_3}{A} \quad (37)$$

$$\xi_5' = \frac{\xi_5}{kA} \quad (38)$$

$$u_c^2(\xi_3') = u(\xi_3)^2 \left(\frac{\partial \xi_3'}{\partial \xi_3} \right)^2 + u(A)^2 \left(\frac{\partial \xi_3'}{\partial A} \right)^2 \quad (39)$$

$$u_c^2(\xi_5') = u(\xi_5)^2 \left(\frac{\partial \xi_5'}{\partial \xi_5} \right)^2 + u(k)^2 \left(\frac{\partial \xi_5'}{\partial k} \right)^2 + u(A)^2 \left(\frac{\partial \xi_5'}{\partial A} \right)^2 \quad (40)$$

Fig. 11은 수치운동응답의 불확실성을 보여준다. 붉은색 점으로 표시된 것은 실험 결과를 나타내며, 청록색 에러 바(error bar)로 나타낸 것은 95% 불확실성 범위를 나타낸 것이다. 불확실성 해석은 3가지 파장비($\lambda/L=0.5, 1.1, 2.0$)에 대해서 수행하였으며 그 결과는 95%의 신뢰구간으로 나타내었다. $\lambda/L=0.5$ 의 경우

$\pm 100\%$ 가 넘는 구간의 불확실성을 보여주었으나 Fig. 11에서 보면 불확실성의 구간의 절대적인 크기는 작은 것을 확인할 수 있다. 이것은 오차를 구할 때 사용되는 운동 응답의 결과값이 아주 작은 값이기 때문에 발생하는 것으로 $\pm 100\%$ 가 넘는 불확실성이 큰 의미는 없다. $\lambda/L=1.1, 2.0$ 의 경우 상하동요 응답은 약 5%, 종동요 응답은 약 7.5%에 해당하는 95% 신뢰구간을 형성하였다.

(a) Heave motion

(b) Pitch motion

Fig. 11 Motion RAO with 95% confidence bands

4.2.2 부가저항의 불확실성 해석

부가저항의 무차원화는 식 (41)과 같이 하였으며, 부가저항의 불확실성 추정을 위한 combined uncertainty는 식 (42)과 같다.

$$R_A = \frac{R - R_0}{\rho g A^2 B^2 / L} \quad (41)$$

$$u_c^2(R_A) = u(R)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial R} \right)^2 + u(R_0)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial R_0} \right)^2 \quad (42)$$

$$+ u(\rho)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial \rho} \right)^2 + u(g)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial g} \right)^2 + u(A)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial A} \right)^2$$

$$+ u(B)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial B} \right)^2 + u(L)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial L} \right)^2$$

Fig. 12 Added resistance with 95% confidence bands

부가저항의 불확실성 해석 결과를 Fig. 12에 나타내었다. x축은 무차원화된 파장, y축은 무차원화된 부가저항을 나타낸다. 붉은색 점으로 표시된 것은 실험 결과를 나타내며, 청록색 에러 바(error bar)로 나타낸 것은 95% 불확실성 범위를 나타낸 것이다. Fig. 12에 나타난 불확실성 결과를 살펴보면, $\lambda/L=0.5$ 의 경우 부가저항이 $\pm 15.83\%$ 에 해당하는 95%의 신뢰구간을 보여주었다. $\lambda/L=1.1$ 의 경우 부가저항의 $\pm 9.83\%$ 에 해당하는 95%의 신뢰구간을 보여주었다. $\lambda/L=2.0$ 의 경우 부가저항의 $\pm 60.76\%$ 에 해당하는 95%의 신뢰구간을 보여주었다. 부가저항의 실험결과는 운동응답의 결과와 비교해 실험결과가 넓게 분산되어 있으며, 불확실성도 크게 추정되었다.

4.2.3 실험 및 계산결과 비교

Fig. 13은 부가저항의 불확실성 결과와 스트립법, 랭킨패널법, 직교격자법의 부가저항 결과를 나타낸 것이다. 스트립법의 계산결과는 실험결과보다 전 영역에 걸쳐서 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 특히 단파장 영역에서는 실험결과와 비교해서 아주 작은값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 2차원 해석 방법인 스트립법의 한계로 이러한 한계를 보완하기 위해서 NMRI의 단파장 영역의 보정법을 적용하면 실험결과와 유사한 경향을 가지는 것을 확인할 수 있다. 랭킨패널법의 부가저항 결과는 3가지 파장비($\lambda/L=0.5, 1.1, 2.0$)에 대해서 모두 95%의 신뢰구간에 계산결과가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 랭킨패널법의

결과에서 부가저항의 최고값이 나타나는 부분이 실험결과와 조금 차이를 보였다. 직교격자법의 부가저항 결과도 3가지 파장 영역에서 95%의 신뢰구간에 포함되는 것을 확인할 수 있으며, 직교격자법의 결과 역시 최고값이 나타나는 부분에서 차이를 보였다. 이로부터 본 연구에서 적용한 수치적 부가저항해석 방법의 결과들은 대체로 95%의 신뢰구간에 존재하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 13 Comparison of added resistance with 95% confidence bands

4.3 부가저항 절감형 선형 해석

선형의 변화에 따른 부가저항의 감소 효과를 파악하기 위하여 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 제공된 KVLCC2 기본선형과 KVLCC2 선형의 부가저항 절감형 선형인 Ax-bow, Leade-bow에 대해서 수치계산 및 모형시험을 수행하였다. 대상선형의 주요 제원은 Table 4와 같으며 Fig. 14와 Fig. 15은 선형의 형상 및 모형형을 각각 나타내고 있다. Ax-bow 선형은 흡수선 위쪽 부분의 선형을 날렵하게 만든 것으로 선수부에서 반사파가 앞쪽이 아닌 양 옆쪽으로 퍼져나가게 만들어서 부가저항이 감소되도록 설계된 선형이다. Leade-bow 선형은 흡수선의 위쪽 부분만 아니라 선수부 전체를 날렵하게 만들어 부가저항이 감소되도록 설계된 선형이다.

Table 4 Principal dimensions of models

Model	KVLCC2 Original	KVLCC2 Ax-bow	KVLCC2 Leade-bow
Lpp (m)	320.0	320.0	328.0
B (m)	58.0	58.0	58.0
D (m)	20.8	20.8	20.8
C _B	0.810	0.810	0.791

실험용 모형선은 축척비 1/100의 목선으로 제작하였으며, 수치

계산결과와 비교 목적으로 선수부의 청파(greenwater) 방지용 물막이 수직벽을 설치하였다. 모형선에서 러더는 장착하지 않았으며 프로펠러 축계는 고려하였다. Ax-bow 선형은 선수부의 흡수선 위쪽만 기본선형과 차이를 보이기 때문에 모형선을 제작할 때 모형선을 2개로 만들지 않고 Fig. 15에서와 같이 모형선의 몸체 부분과 두 개의 선수부 블록으로 분리하여 제작하였다. Leadge-bow 선형은 기본선형과 별도로 하나의 모형선을 만들었다.

Fig. 14 Bow shapes of model ships: KVLCC2 Original, Ax-bow, Leadge-bow

4.3.1 부가저항 절감형 선형의 수치적 접근

수선면 위쪽 형상을 변형하여 부가저항을 감소시키려는 Ax-bow 선형과 같은 선형의 부가저항을 수치적으로 해석하기 위해서는 수선면 위쪽의 형상 변화를 고려할 수 있는 비선형적 접근이 필요하다. 본

연구에서는 부가저항 절감형 선형의 부가저항을 해석하기 위해서 랜킨패널법에 weakly-nonlinear와 weak-scatterer 방법을 적용하였다.

(a) Original

(b) Ax-bow

(c) Leadge-bow

Fig. 15 Bow shapes of test models: KVLCC2 Original, Ax-bow, Leadge-bow

부가저항 절감형 선형에 대해서 weakly-nonlinear 방법을 적용하여 부가저항을 해석하고 그 결과를 Fig. 16에 나타내었다. x, y축은 각각 무차원화 된 파장과 부가저항 값을 나타내며, A는 파진폭을 나타낸다. Weakly-nonlinear의 운동응답을 살펴보면 선형 해석결과보다 weakly-nonlinear의 해석결과가 작은 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 일반적으로 선박의 운동은 비선형 해석의 응답이 선형 해석에 비하여 줄어드는 것과 일치한다. 선형

의 결과보다 운동응답이 줄어들었지만 상하동요 응답에서는 세 가지 선형에 대해서 운동응답에 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 16 Comparison of motion RAOs and added resistance on KVLCC2: $Fn=0.142$, $A/L=0.005$, $\beta=180^\circ$, weakly-nonlinear method

Fig. 17 Comparison of motion RAOs and added resistance on KVLCC2: $Fn=0.142$, $A/L=0.00625$, $\beta=180^\circ$, weak-scatterer method

Weakly-nonlinear 방법보다 고차의 비선형 해석 방법인 weak-scatterer 방법을 적용하여 부가저항 절감형 선형에 대해

서 부가저항을 해석하였다. Weak-scatterer 방법은 실제 입수면에 대해서 복원력 및 Froude-Krylov 힘뿐만 아니라 비선형 유체 동역학적 힘까지 고려한다. 따라서 매 시간 선박의 실제 위치를 고려하여 입사파에 의한 선박의 입수면 및 자유수면에 격자를 생성하고, 그에 따른 경계조건 문제를 해석한다. 이러한 방법은 Table 1에 알 수 있듯이 선형 및 weakly-nonlinear 방법에 비해서 많은 해석 시간이 소요되지만 선박의 입수면에 의한 비선형성을 더욱 반영할 수 있다. 그러나 수치적 구현(numerical implementation)이 쉽지 않으며 매 시간 패널을 생성하고 경계조건 문제를 푸는 과정에서 수치적으로 불안정한 경향을 보였다. 특히 단파장 영역에서는 수렴된 결과를 얻는데 어려움이 있었다. 이러한 어려움으로 인해서 weak-scatterer 방법은 제한된 영역에서 한정된 계산만을 수행하고 그 결과를 Fig. 17에 나타내었다.

Weak-scatter 방법을 적용한 해석조건은 파고가 4m 인 규칙 파가 선수 쪽으로 입사하며, KVLCC2 선형이 $Fn=0.142$ 로 전진하는 경우이다. 운동응답 결과를 살펴보면 Leade-bow 선형의 상하운동 응답이 original 선형 및 Ax-bow 선형과 비교해서 작은 값을 보여주었다. 종동요 응답의 경우 세 가지 선형에 대해서 큰 차이를 보이지 않았다. 반면 부가저항은 세 가지 선형에 대해서 큰 차이를 보였다. 부가저항의 차이는 $\lambda/L=1.0\sim1.5$ 부분인 상대운동이 큰 부분에서 부가저항이 감소하였다. original 선형의 부가저항이 가장 큰 값으로 추정되었고, Ax-bow 선형과 Leade-bow 선형의 부가저항은 비슷한 값으로 추정되었다. Fig. 18는 original 선형과 Ax-bow 선형이 $Fn=0.142$ 로 전진하는 경우 $\lambda/L=1.0$ 에서의 x방향 힘을 나타낸 것이다. x방향 힘에서 Ax-bow 형상에 따른 차이를 보여주었다. 이로부터 weakly-nonlinear 방법은 수선면 위쪽의 형상 변화에 따른 부가저항의 차이를 해석하지 못하는 반면 weak-scatter 해석 방법을 적용한 경우 수선면 위쪽의 형상 변화가 부가저항의 결과에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 수선면 위쪽의 형상을 반영하기 위해서는 weak-scatter 방법을 적용해야 할 것으로 보인다.

Fig. 18 Time signals of x-direction force of KVLCC2: $Fn=0.142$, $A/L=0.00625$, $\lambda/L=1.0$, $\beta=180^\circ$, weak-scatterer method

4.3.2 부가저항 절감형 선형의 실험적 접근

선수부 형상의 변화가 부가저항에 미치는 영향을 알아보기 위해서 Fig. 15의 세가지 선형에 대해서 모형실험을 수행하였다. 모형시험은 설계속도($Fn=0.142$)에서 두 가지($A/L=0.005$, 0.0075) 파고에 대해 수행되었다. 각 선형별로 정수저항은 최소 10회 이상의 반복실험을 수행하고 그 평균을 이용하였으며 파랑 중 일부 실험 조건에서는 여러 차례의 반복 실험을 진행하였다.

실험은 두 가지 파고에 대해서 진행되었으며, Fig. 19과 Fig. 20에서 각각의 파고에 대해서 수직동요 응답 및 부가저항 값을 나타내었다. 상하동요 응답의 결과를 살펴보면 세 가지 선형에 대해서 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 경향은 두 가지 파고에서 동일하게 나타났다. 상하동요 응답의 파고 영향을 살펴보면, 파고가 높은 조건에서 운동응답이 감소한 것을 확인 할 수 있다. 높은 파고에서 운동응답의 감소는 세 가지 선형에서 동일하게 나타났으며 높은 파고에서 운동응답이 감소하는 이유는 선형의 비선형성으로부터 발생하는 것으로 보여진다. 종동요 응답에서도 상하동요의 경향과 비슷한 경향을 보였다. 세 가지 선형에 대해서 종동요 운동은 큰 차이를 보이지 않았고, 높은 파고에서 일부 영역에서 운동응답의 감소하는 경향을 보였다. 부가저항의 결과를 살펴보면 같은 파고조건에서 선형의 변화에 따른 부가저항의 차이를 확인할 수 있다. Original 선형의 부가저항 값이 가장 크고, Ax-bow는 조금 감소한 경향을 보였으며, Leade-bow 선형은 Ax-bow보다 조금 더 감소한 경향을 보였다. 부가저항이 원본 선형과 비교해서 부가저항 절감형 선형인 Ax-bow, Leade-bow 선형에 대해서 감소하는 경향은 높은 파고에서도 동일하게 관측되었다. 이러한 결과는 선형을 날렵하게 만들어 반사파가 앞쪽이 아닌 양 옆으로 퍼져나가게 만든 설계의 목적이 잘 구현된 것으로 보이며 실험 영상으로부터 이러한 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 21는 실험 영상의 정지영상을 나타낸 것이다. 단파장 영역($\lambda/L=0.3$)에서 정지영상을 살펴보면 original 선형의 앞 부분에서 Ax-bow 선형과 Leade-bow 선형보다 더 큰 반사파가 생성되는 것을 확인 할 수 있다. 중간파장 영역($\lambda/L_{pp}=1.2$)에서도 비슷한 경향이 나타나는 것을 Fig. 21에서 확인할 수 있다. 이러한 현상은 수치해석에서도 살펴볼 수 있다. Fig. 22는 original 선형과 Ax-bow 선형이 4m 파고에서 $Fn=0.142$ 로 전진하는 경우 $\lambda/L=1.2$ 에서의 파형 분포를 비교한 것이다. 파형은 입사파를 제외한 선박의 동요 및 신란에 의한 파만을 나타내었다. 파형을 비교하면 Ax-bow 선형의 경우가 선수부에서 파고가 줄어든 것을 확인할 수 있다. 파고가 높은 경우가 파고가 낮은 경우와 비교해서 부가저항이 줄어든 것을 확인할 수 있는데 줄어든 경향을 살펴보면 단파장 영역에서는 큰 변화가 없지만 Fig. 6에서 부가저항을 구성하는 성분 중에서 선박의 상대운동에 의한 성분이 큰 영역에서 부가저항이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이로부터 부가저항이 높은 파고에서 줄어든 원인으로 두 가지를 추측할 수 있다. 첫 번째, 앞에서 살펴본 것과 같이 높은 파고에서 선박의 수직동요 응답의 크기가 감소하기 때문에 부가저항의 값이 줄어든 것으로 보여진다. 두 번째, 선박의 상대운동이 줄어들지 않았더라도 선박의 형상

에 변하였기 때문에 선박의 상대운동으로부터 발생하는 파의 형상이 변하기 이로 인해서 부가저항 값이 줄어드는 것으로 보여진다. 이러한 원인에 대해서는 추후 더욱 체계적인 연구가 필요하다.

(a) Heave motion RAO

(b) Pitch motion RAO

(c) Added resistance

Fig. 19 Comparison of motion RAOs and added resistance on KVLCC2: $F_n=0.142$, $A/L=0.005$, $\beta=180^\circ$

(a) Heave motion RAO

(b) Pitch motion RAO

(c) Added resistance

Fig. 20 Comparison of motion RAOs and added resistance on KVLCC2: $F_n=0.142$, $A/L=0.0075$, $\beta=180^\circ$

(a) KVLCC2 Original, $\lambda/L=0.3$

(b) KVLCC2 Ax-bow, $\lambda/L=0.3$

(c) KVLCC2 Leudge-bow, $\lambda/L=0.3$

(d) KVLCC2 Original, $\lambda/L=1.2$

(e) KVLCC2 Ax-bow, $\lambda/L=1.2$

(f) KVLCC2 Leudge-bow, $\lambda/L=1.2$

Fig. 21 Snapshots of the bow waves: $F_n=0.142$, $A/L=0.005$, $\beta=180^\circ$

Fig. 22 Wave contours of KVLCC2: $F_n = 0.142$, $A/L=0.00625$, $\lambda/L = 1.2$, $\beta = 180^\circ$, weak-scatterer method

(a) Weakly-nonlinear computation

(b) Weak-scatterer computation

Fig. 23 Comparison of added resistance on KVLCC2: $F_n=0.142$, $\beta=180^\circ$

4.3.3 부가저항 절감형 선형의 실험 및 계산결과 비교

앞에서 개별적으로 살펴본 부가저항 절감형 선형의 실험결과와 수치적 결과를 Fig. 23에 비교하였다. Fig. 23(a)는 동일한 파고 조건에서 weakly-nonlinear 해석 방법의 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. Original 선형과 Ax-bow 선형의 결과를 보면 실험결과와 weakly-nonlinear 방법의 결과가 전체적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 랜킨패널법을 이용한 선형해석 결과에서 부가저항의 최고값이 나타나는 파장이 실험과 일치하지 않는 부분도 weakly-nonlinear 결과에서는 개선되었다. Leadge-bow 선형의 결과를 보면 전 영역에서 실험결과와 weakly-nonlinear 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 23(b)는 실험결과와 weak-scatterer 해석 방법의 결과를 비교한 것이다. 실험은 앞에서 설명하였듯이 두 가지($A/L=0.005, 0.0075$) 파고 조건에서 수행 되었는데, weak-scatterer 해석은 $A/L=0.00625$ 조건에서 해석하였다. 동일한 파고 조건은 아니지만 $A/L=0.005$ 조건의 실험결과와 weak-scatterer 해석의 결과를 비교하였다. 부가저항 비교 결과를 살펴보면 original 선형과 비교해서 Ax-bow 및 Leadge-bow 선형에서 부가저항이 감소하는 경향은 일치하지만, 전체적으로 부가저항의 결과가 장파장 영역으로 이동한 것을 알 수 있다. weak-scatterer 해석은 수선면 위쪽 형상을 반영할 수 있지만 단파장 영역에서 부가저항의 계산, 부가저항의 결과가 장파장 영역으로 이동하는 문제를 해결해야 할 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 스트립법, 랜킨패널법, 직교격자법을 이용하여 Series 60 ($C_B=0.8$), S175 컨테이너선, KVLCC2 선박에 대해서 부가저항 해석을 수행하였으며 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 수선면 위쪽의 형상을 반영하기 위해서 랜킨패널법은 비선형 계산(weakly-nonlinear, weak-scatterer)으로 확장하여 세가지 선형(original KVLCC2, Ax-bow, Leadge-bow)에 대해서 부가저항을 추정하였다. 또한 이 세가지 선형에 대해서 모형시험을 수행하고 선형의 변화 및 파고가 부가저항에 미치는 영향을 파악하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 스트립법, 랜킨패널법, 직교격자법을 이용한 수직동요 응답 및 위상은 대체적으로 실험결과와 비슷한 결과를 보여주었다. 스트립법을 이용한 부가저항의 추정은 단파장 영역에서 좋은 결과를 주지 못하였지만 단파장 영역의 보정법을 적용하면 비교적 좋은 결과를 보여주었다. 랜킨패널법을 이용한 부가저항의 추정은 전체적으로 좋은 결과를 보여주었지만, 수선면 위쪽의 형상의 변화가 큰 경우 단파장 영역에서 실험결과와 비교해 부가저항을 작게 추정하였다. 직교격자법을 이용한 부가저항의 추정은 단파장을 포함한 전 영역에서 좋은 결과를 주었다. 단파장 영역 부가저항 추정법 중에서는 실험에 의해 계수를 수정한 NMRI 방법이 실험과 근사한 결과를 보여주었다.

- Weakly-nonlinear 방법을 적용한 부가저항의 추정은 수선면 위쪽의 형상 변화에 따른 부가저항의 차이를 반영하지 못하는 것으로 보인다. 반면 weak-scatterer 해석 방법을 적용한 경우 수선면 위쪽의 형상 변화가 부가저항의 결과에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 수선면 위쪽의 형상을 부가저항의 추정에 반영하기 위해서는 weak-scatterer 방법이나 직교격자법을 적용해야 하지만 단파장 영역에서 부가저항의 해석과 부가저항이 장파장 영역으로 이동하는 문제들을 해결해야 할 것으로 생각된다.
- KVLCC2 선형의 수직운동응답 및 부가저항 실험에 대해서 불확실성 해석을 수행하였으며 단파장 영역을 보정한 스트립법, 랜킨패널법, 직교격자법의 부가저항 추정 결과는 대체로 95%의 신뢰구간에 존재하는 것을 알 수 있었다.
- Original KVLCC2 선형, Ax-bow 선형, Leadge-bow 선형에 대해서 부가저항 실험을 수행하였으며 이로부터 Ax-bow 선형과 Leadge-bow 선형의 부가저항이 감소하는 것을 실험적으로 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 '에너지 절감을 위한 선박 저항감소 및 추진성능 향상 핵심기술 개발' (과제번호: 10040030) 및 LRF* 기금 연구센터의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 지원기관들에게 감사를 드립니다. 그리고 서울대학교 공학연구소(ERI)와 해양시스템연구소(RIMSE)의 행정지원에도 감사드립니다. (* LRF: Lloyd's Register Foundation)

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.
- Chun, H.H., 1992. On the Added Resistance of SWATH Ships in Waves. *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 29(4), pp.75-86.
- Faltinsen, O.M. Minsaas, K.J. Liapis, N. & Skjoldal, 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.
- Fang, M.C. & Chen, G.R., 2006. On the Nonlinear Hydrodynamic Forces for a Ship Advancing in Waves. *Ocean Engineering*, 33(16), pp.2119-2134.
- 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 ITTC*, Ottawa, September 1975, pp.351-360.
- Gerritsma, J. & Beukelman, W., 1972. Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship. *International Shipbuilding Progress*, 19(217), pp. 285-293.
- 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.
- International Organization for Standardization (ISO), 1995. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements*. International Organization for Standardization: Geneva.
- International Towing Tank Conference (ITTC), 2011a. *Seakeeping Experiments (7.5-02-07-02.1), ITTC-Recommended Procedures and Guidelines*. International Towing Tank Conference.
- International Towing Tank Conference (ITTC), 2011b. *Prediction of Power Increase in Irregular Waves from Model Test (7.5-02-07-02.2). ITTC-Recommended Procedures*. International Towing Tank Conference
- Joncquez, S.A.G., 2009. *Second-order forces and moments acting on ships in waves*. Ph.D. Technical University of Denmark.
- Journee, J.M.J., 1992. *Experiments and calculations on four Wigley hull forms*. Delft University of Technology Report 0909-DUT-92. Delft; Delft University.
- Kihara, H. Naito, S. & Sueyoshi, M., 2005. Numerical Analysis of the Influence of Above-Water Bow Form on Added Resistance Using Nonlinear Slender Body Theory. *Journal of Ship Research*, 49(3), pp.191-206.
- 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(13), pp.1357-1367.
- Kim, K.H. Seo, M.G. & Kim, Y., 2012. Numerical Analysis on Added Resistance of Ships. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 21(1), pp.21-29.
- 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.
- Kuroda, M. Tsujimoto, M. Sasaki, N. Ohmatsu, S. & Takagi, K., 2011. Study on the Bow Shapes Above the Waterline in View of the Powering and Greenhouse Gas Emission in Actual Seas. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 226(1), pp.23-35.
- Kwon, Y.J., 1987. A Research on the Added Resistance Due to Wave Reflection. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 24(1), pp.35-41.
- 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. *The 12th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Changwon, Korea, pp. 329-337.
- Maruo, H., 1960. Wave resistance of a ship in regular head seas, Bulletin of the Faculty of Engineering, *Yokohama National University*, 9, pp.73-91.
- Maruo, H. & Ishii, T., 1976. Calculation of Added Resistance in Head Waves by Means of a Simplified Formula. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 140, pp.136-141.
- 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.
- Park, D.M. Lee, J. & Kim, Y., 2014. Uncertainty Analysis on Added Resistance Experiment, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(5), pp.396-408.
- Salvesen, N. Tuck, E.O. & Faltinsen, O., 1970, Ship Motions and Sea Loads. *Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions*, 78, pp. 250-287.

- Sclavounos, P.D., 1985. *User Manual of NIIRID, MIT Report*. Cambridge: MIT.
- 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.
- Seo, M.G. Yang, K.K. Park, D.M. & Kim, Y., 2014. Numerical Analysis of Added Resistance on Ships in Short Waves, *Ocean Engineering*, 97, pp. 97-110.
- Storm-Tejsen, J. Yeh, H.Y.H. & Moran, D.D., 1973. Added Resistance in Waves. *Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions*, 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. et al., 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, pp.485-491.
- 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.
- Yokoi, K., 2007. Efficient Implementation of THINC Scheme: A Simple and Practical Smoothed VOF Algorithm. *Journal of Computational Physics*, 226(2), pp.1985-2002.

박 동 민

서 민 국

이 재 훈

양 경 규

김 용 환