약한 비선형성을 고려한 선박의 선형에 따른 부가저항 비교분석

서민국¹ · 김경환¹ · 박동민¹ · 김용환^{1,†}
서울대학교 조선해양공학과¹

Comparative Study on Added Resistance for Different Hull Forms by using Weakly-Nonlinear Seakeeping Formulations

Min-Guk Seo¹ · Kyong-Hwan Kim¹ · Dong-Min Park¹ · Yonghwan Kim^{1,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹

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.

Recently, the design of commercial ships with less green-house gas is one of great interests in naval architecture fields. Ship designers are asked to find optimum hull forms with minimum resistance in ocean waves. The accurate computation of added resistance, therefore, is getting more important for the prediction of power increase in random ocean waves. This study focuses on the numerical computation of added resistance on ships with Ax-bow shapes which are designed to reduce added resistance. To this end, the time-domain Rankine panel methods based on weakly-nonlinear and weak-scatterer approaches are applied, which can reflect the influence of above-still-water bow shape. As computational models, KCS and KVLCC2 hull forms are considered. Each ship is combined with the three types of Ax-bow shape, and computational results are compared each other.

Keywords : Added resistance(부가저항), Nonlinear ship motion(비선형 선박운동), Ax-bow(Ax형 선수), Greenship(그린쉽)

1. 서론

최근 국제해사기구 (International Maritime Organization, IMO)는 선박의 온실가스 배출을 규제하기 위해서 2013년부터 선박연비제조지수 (Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 도입하기로 결정하였으며, 이로 인하여 조선 및 해운업계에서는 선박의 연료 대비 운항 효율이 주요 관심사가 되고 있다. 선박의 효율을 향상시키기 위해서 저항-추진 분야에서는 추진 장치 주변 유동을 변화시켜 추진 효율을 향상시키거나 선체 주변에 미소 기포 등을 발생시켜 유체의 저항을 감소시키는 방법 등이 고려되고 있으며, 이와 더불어 선박의 내항 분야에서는 부가적인 장치를 장착하여 선박의 부가저항을 줄이는 방법이 고려되고 있다. 부가저항이란 선박이 실제 해상에서 운항하는 경우 바람이나 파랑에 의해 받는 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.

파랑 중 부가저항을 계산하는데 사용되는 주된 두 가지 방법은 모멘텀 보존방법 (far-field method)과 압력직접 적분방법

(near-field method)이다. 모멘텀 보존방법은 Maruo (1960)에 의해서 제안되었으며, 물체 표면에서의 압력을 직접 계산할 필요가 없기 때문에 상대적으로 간단하게 계산 할 수 있어서 실제 응용에 많이 사용된다. Kim (1983)은 모멘텀 보존방법을 사용하여 규칙적 중에서의 부가저항을 계산한 바 있으며, Lew and Kim (1986)은 파장이 비교적 짧은 경우의 부가저항 계산 결과 개선을 위해서 스트립법을 적용한 모멘텀 보존방법을 사용하였다. Kashiwagi, et al. (2009)은 개선된 통합이론 (enhanced unified theory)을 적용한 모멘텀 보존방법을 사용하여 부가저항을 계산한 바 있다.

부가저항을 계산하는 다른 주된 방법인 압력직접 적분방법은 물체 표면의 2차 동유체 압력을 계산하여 적분하는 방법으로, 모멘텀 보존방법에 비해서 계산 과정이 좀 더 복잡하지만 부가저항식의 물리적 해석이 용이하며, 다중 물체 문제나 비선형 문제로 의 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. 최

근에 Joncquez (2009)는 시간 영역에서 고차의 랜킨패널법을 이용하여 부가저항을 계산한 바 있다. 모멘텀 보존방법과 압력직접 적분방법을 모두 사용하여 부가저항을 해석하였으며, 경계 조건 문제를 선형화하기 위한 두 가지 대표적인 방법인 Neumann-Kelvin 및 이중물체(double-body) 선형화 방법을 적용하였다. 또한 Kim and Kim (2010; 2011), Kim, et al. (2012)은 부가저항을 해석하기 위해서 랜킨패널법을 압력직접 적분방법과 모멘텀 보존 방법에 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.

파장이 짧은 파가 선박에 입사되는 경우는 선박의 운동이 거의 없기 때문에 선박에 의해 생성되는 파는 반사파가 지배적이 되며, 기존의 방법으로는 부가저항 계산 값이 실제보다 작게 예측되는 경향이 있다. 이러한 점을 보완하고자 단파장에서의 부가저항을 계산하는 방법을 몇몇 연구자가 정립한바 있다. Fujii and Takahashi (1975)는 고정된 수직의 원기둥에 가해지는 표류력에 대한 식을 선박에 적용할 수 있도록 몇 가지 가정을 통하여 보정 계수를 추가하였다. Faltinsen, et al. (1980)은 단파장을 가진 파가 입사하는 경우 선박의 운동은 없으며, 파에 노출된 영역에서는 완전반사가 발생한다고 가정하여 점근식을 유도하였다. 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.

위와 같은 정확한 부가저항 계산을 위한 연구뿐만 아니라 부가저항을 감소시키기 위한 연구들도 활발하게 진행되고 있다. 부가저항 중 특히 파랑에 의한 부가저항을 감소시키기 위한 몇몇 장치들이 소개된 바가 있으며, 대표적인 부가저항 저감 장치로는 일본에서 제안된 Ax-bow와 leage bow가 있다. Ax-bow는 흘수선 위쪽 선수부 형상을 날카롭게 변형하여, 선박 전방으로의 파의 반사를 완화하여 파랑 중 부가저항을 저감하는 장치이다. Leage bow는 Ax-bow와 유사한 개념의 장치이며, 흘수선 위쪽 뿐만 아니라 아래쪽의 형상 또한 전방으로 날카롭게 만든 점이 차이점이라고 할 수 있다. 이러한 부가저항 저감장치의 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 경계조건 문제를 풀었으며, 2차원의 비선형 해를 스트립 법에 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 연구는 고차 랜킨패널법을 적용한 압력 직접 적분법 및 모멘텀 보존법을 사용하여 부가저항을 계산한 Kim and Kim (2010; 2011), Kim, et al. (2012)의 부가저항 연구를 기본으로 하였으

며, 선박의 흘수선 위쪽의 형상 변화에 따른 부가저항의 변화양상을 살펴보기 위해서 비선형 선박 운동 해석 방법을 부가저항 계산에 적용하였다. 대상선박은 KCS, KVLCC2 선형이며, 각각의 선박 선수부에 3가지 형태의 Ax-bow가 적용되었다. 각 선박에 대한 운동 응답 및 부가저항을 계산 및 비교하고, 그 결과에 대하여 고찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 경계조건문제 및 운동방정식

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

Fig. 1 Coordinate system

선박운동을 해석하기 위해서 비압축성, 비점성 유체, 비회전 유동을 가정하면 속도포텐셜 (ϕ)을 도입할 수 있다. 속도 포텐셜은 유체장과 경계면에서 각각 다음과 같은 라플라스 방정식과 경계조건을 만족하여야 한다.

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

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

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

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \phi) \cdot \nabla \right] \phi = -g\zeta + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad \text{on } z = \zeta(x, y, t) \quad (4)$$

$\vec{\delta} (= \vec{\xi}_T + \vec{\xi}_R \times \vec{x})$ 는 임의의 지점에서의 선박의 변위를 나타내며, ζ 는 파고(wave elevation)를 의미한다. 위의 경계 조건 문제를 선형화하기 위해서 속도포텐셜과 파고를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\phi(\vec{x}, t) = \Phi(\vec{x}) + \phi_I(\vec{x}, t) + \phi_d(\vec{x}, t) \quad (\Phi = O(1), \phi_I = \phi_d = O(\epsilon)) \quad (5)$$

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

Φ 는 기본 포텐셜을 나타내며, 아래첨자 I는 입사파와 관련된 성분을, 아래첨자 d는 교란파와 관련된 성분을 의미한다. Neumann-Kelvin 선형화 방법을 적용하는 경우 기본 포텐셜, Φ 는 균일류 포텐셜 ($-Ux$)이 되며, 이중물체 (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 Φ 를 계산한다. 선형화된 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial\phi_d}{\partial n} &= \sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial\xi_j}{\partial t} n_j + \xi_j m_j \right) - \frac{\partial\phi_I}{\partial n} \quad \text{on } \overline{S_B} \\ (m_1, m_2, m_3) &= (\vec{n} \cdot \nabla)(\vec{U} - \nabla\Phi) \\ (m_4, m_5, m_6) &= (\vec{n} \cdot \nabla)(\vec{x} \times (\vec{U} - \nabla\Phi)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla\Phi) \cdot \nabla \right] \zeta_d &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \zeta_d + \frac{\partial\phi_d}{\partial z} - \nabla\Phi \cdot \nabla \zeta_I \\ &\quad \text{on } z = 0 \\ \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla\Phi) \cdot \nabla \right] \phi_d &= -g\zeta_d - \nabla\Phi \cdot \nabla \phi_I + \left[\vec{U} \cdot \nabla\Phi - \frac{1}{2} \nabla\Phi \cdot \nabla\Phi \right] \\ &\quad \text{on } z = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

선박이 강체인 경우에 운동방정식은 아래와 같이 적용된다.

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

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 교란파로 발생하는 유체동역학적 힘이다.

2.2 수치해석 기법

선형화된 경계조건 문제를 풀기 위해서 아래와 같은 그린정리를 적용하여 적분방정식을 유도하였으며, 경계면을 이산화 하여 3차원 랜킨소스를 선박의 표면과 자유표면에 분포하였다.

$$\begin{aligned} \phi_d + \int_{\overline{S_B}} \phi_d \frac{\partial G}{\partial n} dS - \int_{\overline{S_F}} \frac{\partial\phi_d}{\partial n} G dS \\ = \int_{\overline{S_B}} \frac{\partial\phi_d}{\partial n} G dS - \int_{\overline{S_F}} \phi_d \frac{\partial G}{\partial n} dS \end{aligned} \quad (11)$$

이때 속도포텐셜과 파고, 속도포텐셜의 법선방향 미분 값은 비스플라인 함수(B-spline function)로 가정한 고차의 패널법을 적용하였다.

$$\begin{aligned} \phi_d(\vec{x}, t) &= \sum_j (\phi_d)_j(t) B_j(\vec{x}) \\ \zeta_d(\vec{x}, t) &= \sum_j (\zeta_d)_j(t) B_j(\vec{x}) \\ \frac{\partial\phi_d}{\partial n}(\vec{x}, t) &= \sum_j \left(\frac{\partial\phi_d}{\partial n} \right)_j(t) B_j(\vec{x}) \end{aligned} \quad (12)$$

자유표면 경계조건을 시간에 대해서 적분하기 위해서 수치적으로 양해법-음해법 (explicit-implicit method)이 혼합된 방법을 사용하였으며, 다음과 같이 정리할 수 있다 (Nakos, 1990).

$$\frac{\zeta_d^{n+1} - \zeta_d^n}{\Delta t} = P(\zeta_d^n, \partial\phi_d^n / \partial z) \quad (13)$$

$$\frac{\phi_d^{n+1} - \phi_d^n}{\Delta t} = Q(\zeta_d^{n+1}, \phi_d^{n+1}) \quad (14)$$

운동학적 자유표면 경계조건에서는 이전 시간 단계의 파고와 속도포텐셜의 법선 미분 값을 대입하여 다음 시간 단계의 파고를 계산하며, 동역학적 자유표면 경계조건에서는 운동학적 자유표면 경계조건으로부터 구한 파고를 대입하여 다음 시간 단계에서의 속도포텐셜을 계산한다. 선박의 운동을 계산하기 위해서 4차의 예측 수정자 방법 (predictor-corrector method)을 사용하였다.

3. Ax-bow선형의 부가저항 계산

3.1 Ax-bow의 부가저항 감소 원리

본 연구에서는 Ax-bow의 형상에 따른 부가저항 감소 성능을 비교해 보고자 하는 것을 목표로 하고 있다. Ax-bow는 흘수선 위쪽 부분의 선형을 날렵하게 만든 것으로 부가저항의 감소 원리는 Fig. 2와 같이 설명할 수 있다.

선박이 파랑 중에서 항해를 하는 경우 선수부에서 반사파가 생성되며, 이로 인해서 저항이 증가된다. 특히 Fig. 2의 위쪽 그림에서 나타나는 것과 같이 유조선이나 벌크선의 경우 선수부의 형상이 원본선형 (original shape)과 같이 볼록하기 때문에 반사파가 앞쪽으로 많이 퍼져나가기게 되며, 반사파에 의한 부가저항이 크게 나타나게 된다. 반면 Ax-bow의 경우 흘수선 위쪽 선수부의

형상을 날렵하게 만든 것으로 반사파가 앞쪽이 아닌 양 옆쪽으로 퍼져나가게 된다. 이로 인해서 Ax-bow선형의 경우 반사파에 의한 부가저항이 감소하는 효과가 나타난다. 이와 같이, 부가저항 저감 장치인 Ax-bow는 흡수선 위쪽의 형상이 변화하는 것으로, 기존의 선형 해석으로는 이 장치의 효과를 고려하는 것이 불가능하다. 따라서 비선형 운동 해석 기법을 적용하여 Ax-bow의 효과를 계산해 보고자 한다.

Fig. 2 The principle of Ax-bow (Matsumoto, 2002)

3.2 비선형 운동 해석 기법 및 Ax-bow에의 적용

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-scatterer computation
Froude-Krylov & restoring force			
Hydrodynamic force			
Numerical implementation	Easy to implementation	Easy to implementation	Hard to implementation
Computational time	O(T)	O(T)	O(N×T)

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 정리하였으며, 자세한 내용은 Kim (2011)에서 확인할 수 있다.

3.2.1 Weakly-nonlinear 해석기법

Weakly-nonlinear 해석 기법에서 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M_{jk}] \{\ddot{\xi}_k\} = \{F_{H.D.j}\}_{lin.} + \{F_{F.K.j}\}_{non.} + \{F_{Res.j}\}_{non.} \quad (15)$$

Weakly-nonlinear 해석 기법에서는 실제 입수면적에 대한 복원력을 계산하며, Froude-Krylov 힘 또한 실제 입수면적에 대해서 계산하게 된다. 비선형 복원력은 실제 위치의 수두 압력을 적분한 값에서 정수 중 수두 압력을 적분한 값의 차이로 계산할 수 있으며, 비선형 Froude-Krylov 힘은 선형 입사파 포텐셜을 이용하여 계산할 수 있다. 수선면 위쪽에서는 $z = 0$ 에서의 선형 입사파 포텐셜을 파 높이에 대해서 테일러 전개하여 계산한 후 Froude-Krylov 힘을 계산한다. 비선형 복원력과 Froude-Krylov 힘은 다음과 같다.

$$\{F_{Res.j}\}_{non.} = \int_{S_B} \rho g(-z) \cdot n'_j dS - \int_{S_B} \rho g(-z) \cdot n_j dS \quad (16)$$

$$\{F_{F.K.j}\}_{non.} = -\rho \int_{S_B} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \vec{U} \cdot \nabla \right) \phi_I + \frac{1}{2} \nabla \phi_I \cdot \nabla \phi_I \right\} \cdot n_j dS - \rho \int_{S_B} [\nabla \Phi \cdot \nabla \phi_I] \cdot n_j \quad (17)$$

여기서 $\vec{S}_B$ 와 S_B 는 각각 선박의 평균위치에서의 입수면 및 실제 위치에서의 입수면을 의미하며, n' 은 선박의 실제위치에서의 법선방향 벡터를 의미한다. 이는 선박의 위치를 실제 위치로 Euler 변환한 뒤 계산할 수 있다. 압력 직접 적분을 적용한 경우 부가저항을 계산하는 식은 다음과 같다.

$\vec{n}$ 은 선박의 법선 벡터이며, $\vec{n}_1, \vec{n}_2$ 는 각각 1차, 2차 법선 벡터를 의미한다. 식에 대한 자세한 유도 과정은 Joncquez (2009)에서 확인할 수 있다. 위의 식은 비선형 하중을 적용하여 계산된 비선형의 운동 변화량만이 반영되는 것이며 변화하는 접수면에 대

한 비선형 하중까지 반영하도록 유도된 식은 아니다. 따라서 추 후 이를 엄밀하게 유도하여 적용할 필요가 있다.

$$\begin{aligned}
 \vec{F}_2 = & \int_{WL} \frac{1}{2} \rho g (\zeta - (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x))^2 \cdot \vec{n} dL \\
 & - \rho \int_{WL} \left(-(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) (\zeta - (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x)) \cdot \vec{n}_1 dL \\
 & - \rho \int_{WL} \vec{\delta} \cdot \nabla \left(-(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) (\zeta - (\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x)) \cdot \vec{n} dL \\
 & - \rho \iint_{S_B} g z \cdot \vec{n}_2 dS - \rho \iint_{S_B} \frac{1}{2} (\nabla(\phi_I + \phi_d) \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d)) \cdot \vec{n} dS \\
 & - \rho \iint_{S_B} (g(\xi_3 + \xi_4 y - \xi_5 x)) \cdot \vec{n}_1 dS \\
 & - \rho \iint_{S_B} \left(\frac{\partial(\phi_I + \phi_d)}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d) \right) \cdot \vec{n}_1 dS \\
 & - \rho \iint_{S_B} \vec{\delta} \cdot \nabla \left(\frac{\partial(\phi_I + \phi_d)}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla(\phi_I + \phi_d) \right) \cdot \vec{n} dS \\
 & - \rho \iint_{S_B} \left(-(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) \cdot \vec{n}_2 dS \\
 & - \rho \iint_{S_B} \vec{\delta} \cdot \nabla \left(-(\vec{U} - \frac{1}{2} \nabla \Phi) \cdot \nabla \Phi \right) \cdot \vec{n}_1 dS
 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 \vec{n}_1 = & \begin{bmatrix} 0 & -\xi_6 & \xi_5 \\ \xi_6 & 0 & -\xi_4 \\ -\xi_5 & \xi_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{Bmatrix} \\
 \vec{n}_2 = & \begin{bmatrix} -(\xi_5^2 + \xi_6^2) & 0 & 0 \\ 2\xi_4\xi_5 & -(\xi_4^2 + \xi_6^2) & 0 \\ 2\xi_4\xi_6 & 2\xi_5\xi_6 & -(\xi_5^2 + \xi_6^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \quad (19)$$

3.2.2 Weak-scatterer 해석기법

Weak-scatterer 가정은 선박이 세장체 (slender body)인 경우에 선박에 의해 산란되는 파가 입사파에 비해 작다고 가정한다. ($\zeta \gg \zeta_d$) Weak-scatterer의 가정법에서는 산란파 포텐셜과 파고는 앞의 방법과 동일하게 $O(\varepsilon)$ 으로 정의하는 반면, 입사파 포텐셜과 파고를 $O(1)$ 로 정의한다.

선형 해석법에서는 자유표면 경계조건이 $z = 0$ 에서 만족하기 때문에 매시간마다 같은 격자에 대해서 경계조건 문제가 정의되지만 weak-scatterer 방법에서는 자유표면 경계 조건이 $z = \zeta$ 에서 만족하므로 매시간마다 입사파에 의해 정의되는 자유표면 격자를 생성해 주고 이에 대해 경계조건을 적용해 주어야 한다.

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. 이에 대한 자세한 내용은 Kim (2011)에 나타나 있다.

$$\begin{aligned}
 F_{FKj} = & -\rho \int_{S_B} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi - \nabla \phi_I) \cdot \nabla \right) \phi_I \right\} \cdot \vec{n}_j dS \\
 & + \rho \int_{S_B} \left(\frac{1}{2} \nabla \phi_I \cdot \nabla \phi_I \right) \cdot \vec{n}_j dS
 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
 F_{HDj} = & \\
 & -\rho \int_{S_B} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi - \nabla \phi_I) \cdot \nabla \right) \phi_d \right\} \cdot \vec{n}_j dS \\
 & -\rho \int_{S_B} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla \right) \Phi - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi \right\} \cdot \vec{n}_j dS
 \end{aligned} \quad (21)$$

Weak-scatterer 운동해석 기법을 사용한 경우 부가저항은 파랑 중에서의 x방향 평균 힘에서 정수 중에서의 x방향 힘을 뺀 값으로 계산한다.

4. 계산 결과

4.1 대상선박

본 연구에서 해석하는 선형은 컨테이너선인 KCS와 초대형 원유운반선인 KVLCC2에 각각 Ax-bow가 장착된 선형으로, 주요 제원은 다음의 표와 같다.

Table 2 Main dimensions of test models

	KCS	KVLCC2
Lpp (m)	230.0	320.0
Bwl (m)	32.2	58.0
D (m)	19.0	30.0
T (m)	10.8	20.8
Displacement (m ³)	52,030	312,622

Fig. 3, 4는 각각 KCS, KVLCC2 원본 선형과 Ax-bow가 장착된 선형의 패널형상을 나타내고 있다. (a)는 Ax-bow가 장착되지 않은 원본 선형이며, (b)~(d)는 Ax-bow가 크기 별로 장착되어 있는 선형의 형상을 나타내고 있다. Type1의 경우 선수부의 형상이 z방향으로 넓게 분포된 사다리꼴 형태를 띠고 있으며, 원본 선형에서 가장 많이 바뀐 모습을 하고 있다. Type3는 선수부의 형상이 삼각형이며, type2는 type1과 type3의 중간 형상을 하고 있다.

(a) Original (b) Type1 (c) Type2 (d) Type3

Fig. 3 Panel models of KCS + Ax-bow

Fig. 4 Panel models of KVLCC2 + Ax-bow

4.2 부가저항 해석 결과

4.2.1 Weakly-nonlinear 해석 결과

Weakly-nonlinear 방법을 사용하여 KCS와 KVLCC2에 대하여 부가저항을 해석하였다. Fig. 5, 6은 파고가 각각 4m, 8m인 선수파에서 KCS 선형이 $F_n = 0.26$ 으로 전진하는 경우의 부가저항 계산 결과를 나타내고 있다. x, y 축은 각각 무차원화 된 파장과 부가저항 값을 나타내며, A 는 파 진폭을 의미한다. 그림에서 확인할 수 있듯이 weakly-nonlinear의 해석 결과가 선형 해석 결과에 비해서 부가저항이 작게 나타나고 있다. 일반적으로 선박의 운동은 비선형 해석 시 선형 해석에 비하여 운동의 크기가 줄어들며 이에 따라 부가저항의 크기도 줄어든 것으로 생각 된다. 그러나 Ax-bow 형상에 따른 부가저항의 차이는 나타나지 않고 있다.

Fig. 7, 8은 파고가 각각 4m, 8m인 선수파의 조건에서 KVLCC2 선형이 $F_n = 0.142$ 로 전진하는 경우의 부가저항 계산 결과를 나타내고 있다. 파고가 4m인 경우에 비해서 8m인 경우 부가저항이 더 감소하였으나, KCS의 경우와 같이 Ax-bow의 형상에 따른 차이는 나타나지 않는다.

Fig. 5 Comparison of added resistance on KCS: $F_n = 0.26$, $H_w = 4m$, $\beta = 180^\circ$, weakly-nonlinear method

Fig. 6 Comparison of added resistance on KCS: $F_n = 0.26$, $H_w = 8m$, $\beta = 180^\circ$, weakly-nonlinear method

Fig. 7 Comparison of added resistance on KVLCC2: $F_n = 0.142$, $H_w = 4m$, $\beta = 180^\circ$, weakly-nonlinear method

Fig. 8 Comparison of added resistance on KVLCC2: $F_n = 0.142$, $H_w = 8m$, $\beta = 180^\circ$, weakly-nonlinear method

Weakly-nonlinear 해석방법으로 선박의 부가저항을 해석한 결과, 비선형 운동해석을 함으로써 운동 및 부가저항이 선형 해석 결과에 비해서 감소하는 효과는 확인 할 수 있으나, Ax-bow의 형상 변화에 따른 차이는 나타나지 않음을 확인하였다. 이는 weakly-nonlinear 방법의 경우 Froude-Krylov 힘과 복원력의 비선형성만을 고려하므로 Ax-bow에 의해 산란되는 파의 영향을 제대로 반영하지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 선박의 동요와 산란에 의한 힘인 유체동역학적 힘의 비선형성까지 고려하는 weak-scatterer 방법을 사용해야 할 것으로 생각된다.

4.2.2 Weak-scatterer 해석 결과

고차의 비선형 해석방법인 weak-scatterer 기법을 사용하여 Ax-bow의 부가저항 감소효과를 해석하였다. Weak-scatterer 해석 기법은 매시간 선박의 실제 위치를 고려하여 입사파에 의한 선박의 입수면 및 자유표면에 격자를 생성하고, 그에 따른 경계 조건 문제를 해석하는 방법으로, weakly-nonlinear 해석 방법에 비하여 많은 해석 시간이 소요되지만 선박 입수면에 의한 비선형성을 더욱 반영할 수 있다. Fig. 9는 weak-scatterer 방법을 적용할 때 시간에 따른 패널 변화 양상을 나타내고 있다.

Fig. 9 Panel shapes of KCS + Ax-bow type1: $Fn = 0.26$, $H_w = 4m$, $\lambda/L = 1.2$, $\beta = 180^\circ$, weak-scatterer method

Fig. 10은 KVLCC2 원본선형 및 Ax-bow type1 선형이 $Fn = 0.142$ 로 전진하는 경우 $\lambda/L = 1.2$ 에서의 파형 분포를 비교한 것이다. 여기서 나타난 파형 분포는 입사파를 제외한 선박의 동요 및 산란에 의한 파만을 나타낸 것이다. Ax-bow를 장착한 경우 선수부에서 파고가 줄어든 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 KVLCC2 선형이 $Fn = 0.142$ 로 전진하는 경우 $\lambda/L = 1.0$ 에서의 상하동요 운동 및 x방향 힘을 나타낸 것이다. 상하동요

Fig. 10 Wave contours of KVLCC2: $Fn = 0.142$, $H_w = 4m$, $\lambda/L = 1.2$, $\beta = 180^\circ$, weak-scatterer method

(a) Heave motion time signals

(b) Surge force time signals

Fig. 11 Time signals of KVLCC2: $Fn = 0.142$, $H_w = 4m$, $\lambda/L = 1.0$, $\beta = 180^\circ$, weak-scatterer method

운동의 경우 Ax-bow의 장착 여부에 관계없이 유사한 값을 나타내고 있으나, x방향 힘은 Ax-bow의 형상에 따른 차이를 보이고 있다. Fig. 10과 11에서 볼 수 있듯이, Ax-bow의 장착 여부 및 형상은 운동에는 큰 영향을 미치지 않지만, 반사되는 파의 크기 및 형태에 영향을 준다는 것을 확인 할 수 있으며, 이러한 영향이 부가저항의 감소에 긍정적인 역할을 하는 것으로 생각된다.

Fig. 12, 13은 파고가 4m인 규칙파가 선수 쪽으로 입사하며, KCS 선형이 $F_n = 0.26$ 로 전진하는 경우의 운동 응답 및 부가저항을 weak-scatterer 방법으로 계산한 결과를 나타내고 있다. Fig. 12에서 (a)는 상하동요 운동응답을, (b)는 종동요 운동응답을 나타내며 파장에 따른 결과를 보여주고 있다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이, weak-scatterer 방법으로 계산한 운동 응답 결과가 선형 운동해석 방법으로 계산한 결과보다 작게 나타나고 있으나, Ax-bow의 형상의 변화에 따른 운동 응답의 차이는 거의 나타나

Fig. 12 Comparison of motions of KCS: $F_n = 0.26$, $H_w = 4m$, $\beta = 180^\circ$, weak-scatterer method

지 않음을 알 수 있다. 반면, Fig. 13의 부가저항 계산 결과를 확인하면, Ax-bow의 형상에 따른 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 운동응답에서는 Ax-bow의 형상에 따른 차이가 거의 없었음에도 불구하고 부가저항에서 차이를 보이는 것은 선박 운동에 의한 부가저항은 거의 유사하지만, 반사파에 의한 부가저항은 차이가 있다는 것을 의미한다. 근본적으로 Ax-bow의 부가저항 감소효과가 반사파에 의한 부가저항 감소임을 감안하면, 이러한 효과가 계산 결과에 잘 나타나고 있다는 것을 알 수 있다.

Ax-bow의 형상에 따른 결과를 좀 더 살펴보면, Ax-bow type1의 부가저항이 원본 선형의 부가저항 보다 작게 나타나고 있으며, Ax-bow type3의 부가저항의 경우 원본 선형의 부가저항보다 유사하거나 약간 큰 값을 주고 있다. Fig. 3의 Ax-bow의 형상을 살펴보면, type1의 선수부 형상이 z방향으로 넓게 분포되어 있으며, 원본 선형에서 가장 많이 바뀐 모습을 하고 있다. 이로 인해서 가장 좋은 부가저항 감소 효과를 보여주는 것으로 생각된다.

Fig. 13 Comparison of added resistance on KCS: $F_n = 0.26$, $H_w = 4m$, $\beta = 180^\circ$, weak-scatterer method

Fig. 14, 15는 파고가 4m인 규칙파가 선수 쪽으로 입사하며, KVLCC2 선형이 $F_n = 0.142$ 로 전진하는 경우의 운동 응답 및 부가저항을 weak-scatterer 방법으로 계산한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 나타나는 바와 같이 KVLCC2의 운동응답은 Ax-bow의 형상에 따른 차이가 거의 나타나고 있지 않는 반면, 부가저항은 다소 큰 차이를 보이고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 선박 운동에 의한 부가저항은 거의 유사하지만, 선수부의 반사파에 의한 부가저항에서 Ax-bow의 형상에 따른 차이가 있다는 것을 의미한다.

또 한 가지 주목할 점은 Ax-bow의 부가저항의 감소효과는 KVLCC2에 장착한 경우가 KCS에 장착한 경우보다 훨씬 크게 나타나고 있다는 것이다. 이는 Ax-bow의 목적이 유조선이나 벌크 선과 같은 선수부 수선면의 형상이 뭉툭한 선형의 부가저항을 줄

(a) Heave motion RAO

(b) Pitch motion RAO

Fig. 14 Comparison of motions of KVLCC2: $F_n = 0.142$, $H_w = 4m$, $\beta = 180^\circ$, weak-scatterer method Fig. 15 Comparison of added resistance on KVLCC2: $F_n = 0.142$, $H_w = 4m$, $\beta = 180^\circ$, weak-scatterer method

이는 것임을 감안하면, 이에 잘 부합되는 계산 결과라고 생각된다. 그리고 Fig. 3, 4의 선수부 형상을 비교해 보면, KVLCC2에 Ax-bow를 장착한 경우가 KCS 선형의 경우 보다 선수부의 형상이 앞쪽으로 더 많이 날렵해 진 것을 확인할 수 있다. 이로 인해서 KVLCC2 선형에 Ax-bow를 장착하는 경우가 부가저항 감소효과가 클 것으로 예상되며, 계산 결과도 이러한 경향을 잘 보여주고 있는 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 시간영역 고차 랜킨패널법을 적용한 비선형 운동 해석 방법을 사용하여 흘수선 위쪽 선형의 형상 변화에 따른 부가저항의 변화 양상을 다루었다. 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- Weakly-nonlinear 해석 방법을 적용한 부가저항 계산의 경우 선수부 형상 변화에 따른 부가저항의 변화가 나타나지 않았으며, 이는 Ax-bow에 의해 산란되는 파의 영향을 제대로 반영하지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 반면 weak-scatterer 해석 방법을 적용한 경우 선수부 형상 변화에 따른 부가저항의 변화가 나타났다. 따라서 흘수선 위쪽의 형상변화에 따른 부가저항의 변화를 확인하기 위해서는 weak-scatterer 해석 방법이 적용되어야 할 것으로 생각된다.
- Weak-scatterer 해석 방법으로 계산한 부가저항 결과를 확인해 보면, 선수부의 형상이 z방향으로 넓게 분포된 사다리꼴 형태인 경우(Ax-bow type1) 부가저항 측면에 유리한 것을 확인할 수 있다. 부가저항의 감소를 위해서는 type1과 같은 형상이 사용되어야 할 것으로 생각된다.
- Ax-bow의 부가저항 감소효과는 컨테이너선인 KCS 선형 보다 초대형 유조선인 KVLCC2에서 더 크게 나타난다. 이는 초기의 KVLCC2의 선수부의 형상은 KCS 보다 더 볼록하였으며 이로 인해서 앞쪽으로 산란되는 파가 많았지만, Ax-bow를 장착하면서 선수부 형상을 날카롭게 만들어 주어 앞쪽으로 산란되는 파의 양을 KCS 보다 더 많이 줄여 주었기 때문으로 생각된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 '에너지 절감을 위한 선박 저항감소 및 추진성능 향상 핵심기술 개발'(과제번호:10040030) 및 LRET 연구과제의 결과임을 밝히며, 지원기관들에게 감사드립니다. 아울러, 서울대학교 공학연구소 및 해양시스템공학연구소의 행정지원에도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 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(1), 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. & Skjørdal, S.O., 1980. Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway. *Proceeding of 13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, Japan.
- 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.
- Fujii, H. & Takahashi, T., 1975. Experimental study on the resistance increase of a ship in regular oblique waves. *Proceeding of 14th ITTC*, Ottawa, Canada.
- Joncquez, S.A.G., 2009. *Second-order forces and moments acting on ships in waves*. Ph.D. Technical University of Denmark.
- Kashiwagi, M. Takehiro, I. & Takuma, S., 2009. Effect of forward speed of a ship on added resistance in waves. *Proceedings of 19th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan.
- 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, H., 1983. On the Added Resistance of a Ship in a Regular Head Sea. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 20(3), pp.17–20.
- 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., 2011. *Computational study on nonlinear motion based on weak-scatterer hypothesis and ship structural hydroelasticity in waves*. Ph.D. Seoul National University.
- 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. et al., 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.
- Lew, J.M. & Kim, H., 1986. On the Prediction Method of Added Resistance of Ships in Regular Head Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 23(2), pp.14–20.
- Maruo, H., 1960. The Drift of a Body Floating on Waves. *Journal of Ship Research*, 4(3), pp.1–10.
- Matsumoto, K., 2002. Ax-Bow : A New Energy-saving Bow Shape at Sea. *NKK Technical review No. 86*, pp.46–47.
- Nakos, D.E., 1990. *Ship wave patterns and motions by a three dimensional Rankine panel method*. Ph.D. Massachusetts Institute of Technology.

서민국

김경환

박동민

김용환