

선박의 파랑 중 운항성능을 고려한 초기 선형설계에 대한 연구

정유원·김용환[†]·박동민
서울대학교 조선해양공학과

Study on Ship Performance in a Seaway for Application to Early Stage of Hull-Form Design

Yoo-Won Jung·Yonghwan Kim[†]·Dong-Min Park
Department of Naval Architecture & 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 introduces a study on ship performance in waves to consider the effects of added resistance in the early stage of hull-form design. A ship experiences a loss of speed in actual seaways, hence this study proposes the overall procedure of a new design concept that takes into account the hydrodynamic performance of ship in waves. In the procedure, the added resistance is predicted using numerical methods: slender-body theory and Maruo's far-field formulation, since these methods are efficient in initial design stage, and an empirical formula is adopted for short waves. As computational models, KVLCC2 hull and Supramax bulk carrier are considered, and the results of added resistance and weather factor for test models are discussed. The computational results of vertical motion response and added resistance of KVLCC2 hull are compared with the experimental data. In addition, the sensitivity analysis of added resistance and weather factor for KVLCC2 hull to the variations of ship dimensions are conducted, and the change of the added resistance and propulsion factors after hull form variations are discussed.

Keywords : EEDI(선박에너지효율설계지수), Weather factor(기상보정계수), Added resistance(부가저항), Hull-form design(선형설계), Concept design(개념설계), Slender-body theory(세장체 이론)

1. 서론

최근 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)가 선박의 온실가스 방출을 규제하기 위해 선박에너지효율설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 도입함으로써 선박의 운항 효율에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 EEDI 규정은 선형설계에 영향을 미치기 때문에 운항 효율에 대한 고려가 선박의 초기 설계 과정에서 중요한 문제로 대두될 것으로 예측된다. 이때 EEDI 식에는 기상보정계수(f_w)가 포함되어 있고, 이는 선박의 운항 중 속도 저감 혹은 마력 증가를 의미한다. 실제로 선박은 실제 해상상태에서 속도 저감이 발생하기 때문에, 실제 환경하중이 존재하는 조건에서 선박의 운항 성능을 예측하여야 한다. 또한 선형 설계는 매우 시간이 많이 걸리는 과정이기 때문에 초

기 설계 단계에서는 저항에 대한 높은 정확도 예측보다는 계산의 효율성이 중요하다. 따라서 파랑 중 선박의 성능 및 부가저항에 대한 정확한 예측뿐만 아니라 이를 효율적으로 예측할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

파랑 중 부가저항의 계산은 이상 유동(ideal flow)에 근거한 포텐셜 기반 수치 기법들을 활용한 연구가 많이 진행되어 왔고 이는 크게 모멘텀 보존방법과 입력직접 적분방법으로 나눌 수 있다. 모멘텀 보존방법은 Maruo (1960)에 의해 제안되었고, 다른 방법들에 비해 상대적으로 간단하게 계산할 수 있어서 그동안 많이 활용되어 왔다. 이 방법은 Newman (1967), Gerritsma and Beukelman (1972), Salvesen (1978)에 의해 더욱 개발되었고, 최근 Kashiwagi, et al. (2010)은 보완된 통합이론(enhanced unified theory)을 적용하여 부가저항을 계산하기도 하였다. 입력직접적분법은 물체 표면의 2차 동유체 압력을 계산하여 적분하

는 방법으로, 모멘텀 보존방법에 비해서 계산 과정이 더 복잡하지만 부가저항 식의 물리적 해석이 용이하며, 다중 물체 문제나 비선형 문제로의 확장이 수월하다는 장점이 있다. Faltinsen, et al. (1980)은 스트립 방법을 적용하여 계산한 선박의 운동에 대해 압력직접적분법을 적용하여 부가저항 문제를 해석하였으며, Choi, et al. (2000)은 주파수 영역에서의 그린함수법(green function method)에 기반을 둔 압력직접 적분방법을 사용하여 파랑 중 부가저항을 해석하였다. 최근에는 Joncquez (2009) 및 Kim and Kim (2010; 2011)은 시간 영역에서의 고차 랜킨패널법을 이용하여 규칙 파랑에서 부가저항을 계산한 바 있는데, 특히 Kim and Kim (2010; 2011)의 연구에서는 불규칙 파에서의 부가저항 해석을 위한 기준을 제시한 바 있다.

이러한 파랑 중 부가저항 문제에서 어려운 부분은 단파장 영역에서의 부가저항 해석이다. 최근 선박이 대형화됨에 따라서 일반적인 해상상태에서의 배 길이에 비해 상대적으로 파장이 짧은 영역으로 집중되는데, 단파장 영역에서의 부가저항은 기존의 수치해석 기법으로는 정확하게 계산하는 데에 한계가 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해서 Fujii and Takahashi (1975)는 실험을 통한 보정계수를 도입하여 수직 원기둥에 가해지는 표류력에 대한 식을 선박에 적용할 수 있도록 수정하였다. 아울러 Faltinsen, et al. (1980)은 선박을 정수면 단면을 갖는 무한한 실린더로 가정하고, 입사파가 물체표면에서 전반사가 일어난다는 가정을 도입하여 단파장 영역에서의 부가저항 이론식을 유도하였다. 또한 최근 일본의 NMRI(National Maritime Research Institute)에서는 Fujii and Takahashi (1975)의 식을 기반으로 하여 여러 실험값을 통해 보정계수를 보완한 경험식을 제시한 바 있다 (Tsujimoto, et al., 2008; Kuroda, et al., 2008).

최근에는 선박의 운항효율에 대한 해석 절차가 여러 국제기구에 의해 제시되고 있다. ITTC(International Towing Tank Conference)는 불규칙파 중에서의 소비 마력 증가를 규칙파 중에서의 모형시험 자료를 사용하여 실험적으로 예측하기 위한 절차 (ITTC, 2011)를 제시한 바 있다. 그리고 IMO 산하의 해양환경 보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC)는 기상보정계수를 추정하기 위한 가이드라인 (IMO, 2012)을 제시하였고, 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)는 선박의 시운전 결과를 사용하여 선박의 속도 저감을 평가하는 가이드라인 (ISO, 2015)을 제시하였다.

파랑 중 선박의 속도 저감은 선종마다 적지 않는 차이가 있는데, 이러한 속도 감소에 대한 추정 연구로써 Journee (1992)는 Gerritsma and Beukelman (1972) 방법을 이용하여 부가저항을 해석하고 이를 이용하여 Dart-Europe 선박에 대해 실험에서의 속도 감속을 추정한 바 있다. 또한, Feng, et al. (2010)은 VLCC 선형에 대한 부가저항을 추정하고, 이를 통해 선박이 실제 운항하는 경로에서의 장기 예측을 수행하여 속도 감소와 연료소모량을 예측하였다. Prpic-Orsic and Faltinsen (2012)은 S175에 대해 프로펠러의 노출 및 공기 유입으로 인한 효과를 고려하여 불규칙 파에서의 속도 저감을 예측하였으며, Chuang and Steen (2013)은 선수파 및 사파중에서의 자유 항주 모형시험을 통해 파

에 의한 선박의 속도 저감을 실험적으로 예측하였다. Kim, et al. (2015)은 RANS(Renolds Averaged Navier-Stokes equations)를 기반으로 한 전산유체역학 (CFD) 방법을 이용하여 KCS 선박에 대해 부가저항과 속도 감소를 계산하였다.

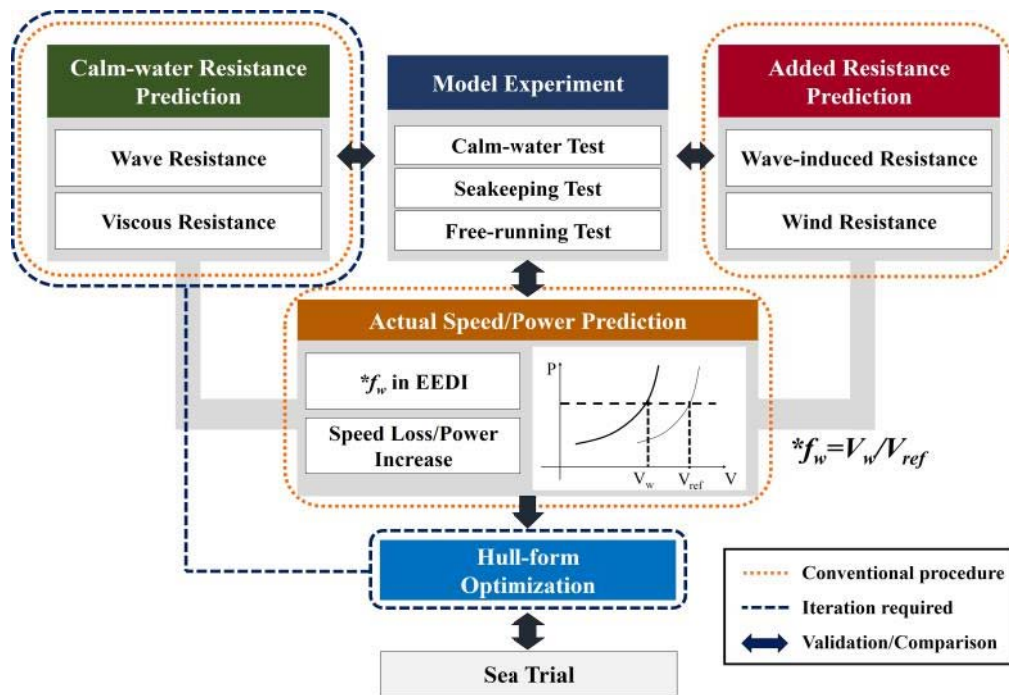
최근에는 파랑 중 부가저항의 중요성이 강조됨에 따라 선형 최적화 과정에 파랑 중 부가저항을 최소화 하려는 노력이 진행되고 있다. 예를 들어, Grigoropoulos (2004)는 정수 중과 파랑 중 선박의 성능을 최적화하기 위해 선박의 주요치수와 그 외의 주요 선형 변수들을 변환한 바 있다. 또한 Zalek, et al. (2009)는 개념설계 단계에서의 선형 최적화를 위해 미해군 함정에 대한 추진 성능과 내항성능을 선박과 프로펠러의 주요치수를 변수로 하여 평가하였는데, 이때 부가저항은 모멘트 방법을 적용하여 추정하였다. Tasrief and Kashiwagi (2014)는 SR-108 선박에 대해 통합이론(enhanced unified theory)을 통해 얻은 중동요 변위와 부가저항의 최고값을 줄이기 위한 선형 최적화를 수행하였다. 이러한 선형 연구들이 대부분 부가저항과 속도 저감을 계산하기 위해 방법론적인 측면에서 접근하고 이를 적용하여 선형 최적화를 수행하였다면, 본 연구에서는 운항 성능을 선형 설계로 적용하기 위한 효율적인 계산 절차를 제안하는 것에 연구의 초점을 맞추었다.

본 연구에서는 파랑 중 선박의 유체성능을 선형 설계에 적용하기 위한 전체적 절차와 수치해석 방법을 제안하였다. 또한 선박의 초기 선형설계 단계에 적용하기 위한 대표 해상상태에서의 부가저항과 기상보정계수에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 본 연구에서 적용된 수치기법으로는 세장체 이론을 기반으로 한 스트립 방법을 이용하여 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 제공된 KVLCC2와 Supramax에 대해 선박의 운동 문제를 해석하였고, 이에 모멘텀 보존법을 적용하여 파랑 중 부가저항을 해석하였다. 이는 다른 방법보다 계산의 양에 있어서 효율적이기 때문에 매우 많은 계산이 요구되는 선형 설계와 같은 과정에 효과적으로 사용될 수 있다. 파랑 중 부가저항의 단파장 영역에서의 보완을 위해서는 NMRI 식 (Kuroda, et al., 2008)을 사용하였고, 이렇게 얻어진 규칙파에서의 부가저항 결과로부터 선형 중첩법을 이용하여 불규칙파 중 부가저항과 기상보정계수를 추정하였다.

2. 새로운 선형설계 절차의 제시

전통적인 선형설계 방법은 정수 중 저항만을 설계의 목적함수로 고려한다. 하지만 실험에서의 운항성능을 높이기 위해서는 파랑 중 부가저항에 대한 평가도 이루어져야 한다. 또한 IMO에 의해 제안된 선박에너지효율설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)가 중요한 문제로 대두됨으로써 선박의 설계 단계에서도 EEDI 규정을 만족하기 위한 새로운 선형설계 방법이 제시되어야 한다.

본 연구에서는 새로운 선형설계 절차에 대한 개념을 제시하였고, Fig. 1은 이를 도식화한 그림이다. 이 절차에서는 먼저 정수 중 저항과 파랑 중 부가저항을 수치적으로 추정하고, 수치해석결



$$Energy\ Efficiency\ Design\ Index = \frac{\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^*) + \left(\prod_{j=1}^n f_j \sum_{i=1}^{nPT} P_{PT(i)} - \sum_{i=1}^{nEF} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot [f_w] \cdot V_{ref}}$$

Fig. 1 Mainframe of the new design concept and EEDI formula

과가 어느 정도의 정확도를 가지는지 모형실험의 결과와 비교분석한다. 다음으로, 실제 해상상태 중 선박의 운항성능을 평가하기 위해 기상보정계수를 추정한다. 기상보정계수는 EEDI 식의 분모에 포함이 되는 계수로 선박의 운항 중 환경하중에 의한 속도 감소를 나타낸다. 따라서 정수 중 저항과 파랑 중 부가저항을 이용하여 기상보정계수를 추정하고, 총 저항과 기상보정계수를 선형설계의 설계 목적함수로써 평가한다. 최적화된 선형을 얻기 위해서는 이러한 과정이 반복되어 평가되어야 하고, 이를 위해 선박의 저항과 기상보정계수 또한 반복적으로 계산되어야 한다.

3. 선박의 운항성능 예측 방법

3.1 기상보정계수 추정법

기상보정계수는 EEDI 식에 포함된 무차원화 계수로, 대표적인 파고, 파 주파수, 바람 속도에 해당되는 대표해상상태에서의 선박의 속도 감소를 의미한다. 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 IMO MEPC.1/Circ.796 (IMO, 2012)를 통해 기상보정계수 추정을 위한 기본적인 절차를 제안하였다. 이 절차에 의하면 기상보정계수는 정수 중 상태에서와 대표해상상태에서의 저항 추정을 통해 얻어진 엔진출력-속도 곡선을 이용하여 계산된다. 따라서 어떠한 수치해석 방법을 이용하여 저항

을 추정할 것인지에 따라 이 기상보정계수 추정법의 정확도와 효율성이 결정된다고 할 수 있다.

선박의 유체역학적 성능 예측의 정확도는 일반적으로 계산 방법에 영향을 받는다. 복잡한 계산 방법, 이론 등을 이용한다면 더 좋은 정확도를 기대할 수 있고, 더 높은 비선형성을 고려할 수 있다. 하지만 높은 정도의 정확도는 상당히 많은 노력과 계산 시간이 요구된다. 본 연구에서는 특히 초기 설계단계에서의 선박의 성능을 예측하고자하기 때문에, 정확도가 높으면서 시간이 오래 걸리는 방법 보다는 선형설계단계에 적용할 수 있게 효율적으로 예측할 수 있는 방법에 초점을 맞추었다. Fig. 2는 IMO MEPC.1/Circ.796 (IMO, 2012)의 절차를 바탕으로 하여 기상보정계수 추정의 효율을 향상시킬 수 있는 수치 계산을 적용한 절차이다.

먼저 설계 속도에 대해 정수 중 저항 및 바람과 파도에 의한 부가저항을 추정하고 이를 합하여 총 저항을 계산한다. 정수 중 저항은 Holtrop and Mennen method (1982) 방법의 회귀식을 이용하여 추정한다. 이 방법은 축적된 모형실험의 데이터와 초기 설계 단계에서 최소 요구 마력을 결정하기 위해 얻어지는 데이터를 이용해 개발되었다. 이 회귀식을 통해 얻어지는 정수 중 저항은 모형실험이나 다른 정밀한 수치 해석을 통해 얻어지는 결과보다 정확도가 낮을 수 있다. 하지만 선형 최적화와 같이 많은 계산이 요구되는 과정에서 여러 번의 실험이나 높은 수준의 정확도를 갖은 수치해석의 적용에는 어려움이 있고, 설계자의 필요에

따라 이러한 기법도 더 높은 정확도가 기대되는 해석기법으로 교체하면 될 것이다.

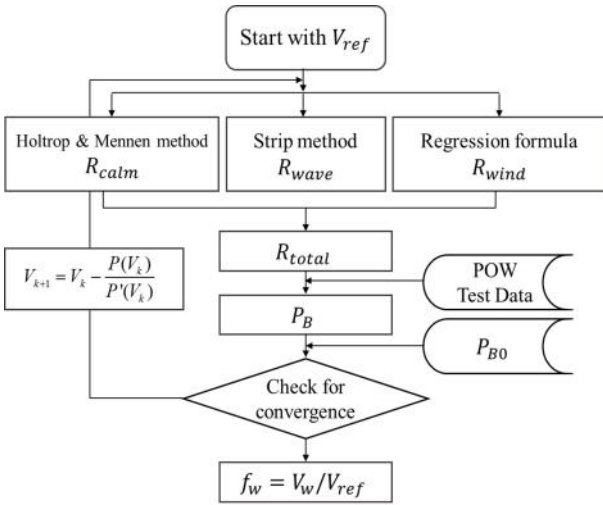


Fig. 2 Flowchart of the estimation of weather factor

본 연구에서 적용한 Holtrop and Mennen (1982) 방법은 모든 선형이 반영되기에 한계가 있기 때문에 대상 선형에 제한이 있다. 이에 대해 Manen and Oossanen (1988)은 선종 별로 Holtrop and Mennen (1982)의 방법을 적용할 수 있는 선형의 범위를 정리하였고, 이는 Table 1과 같다. 본 연구에서는 시험 대상 선형에 대해 이와 같은 조건을 만족하는지 확인 후 계산을 수행하였다.

Table 1 Limitations of Holtrop and Mennen method (Manen and Oossanen, 1988)

Ship type	Max Fn	C _p		L/B		B/T	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
Tankers, bulk carries	0.24	0.73	0.85	5.1	7.1	2.4	3.2
Trawlers, tugs	0.38	0.55	0.65	3.9	6.3	2.1	3.0
Container, destroyers	0.45	0.55	0.67	6.0	9.5	3.0	4.0
Cargo liners	0.3	0.56	0.75	5.3	8.0	2.4	4.0
RoRo Ships, Car ferries	0.35	0.55	0.67	5.3	8.0	3.2	4.0

바람에 의한 부가저항은 평균 바람의 속도와 방향에 대해 선박의 정면 투영면적과 풍 하중 계수를 통해 얻어진다. 보통 풍 하중 계수는 풍동 실험이나 여러 경험식을 이용하여 계산한다. 본 연구에서는 Fujiwara, et al. (2006)에 의해 제안된 회귀식을

사용하여 풍 하중 계수를 추정하였다. 이 방법은 여러 풍동 실험을 통한 회귀분석으로 얻어진 계수들을 이용하여 계산한다. 파랑 중 부가저항을 추정하기 위해서는 세장체 이론을 적용하여 규칙 파 중 파랑 중 부가저항을 추정한다. 파랑 중 부가저항에 대한 내용은 3.2에 더 자세히 소개되었다.

저항 추정이 이루어진 후에는 ISO-15016 (2015)의 Direct Power Method를 적용하여 제동 마력을 추정하고, 얻어진 제동 마력이 정수 중 상태에서의 설계 속도에 대한 제동 마력과 같은지 확인한다. 같지 않다면, 속도를 변화시켜 제동 마력이 같아질 때까지 전체 과정을 반복하여 수행한다. 최종적으로 수렴하게 되면, 그때의 속도와 설계 속도의 비를 이용하여 기상보정계수를 계산한다.

3.2 파랑 중 부가저항

특정 해상 상태에서의 파랑 중 부가저항은 규칙파에서의 부가저항과 파랑 스펙트럼의 선형 중첩을 이용하여 계산할 수 있다. 본 연구에서는 Salvesen-Tuck-Faltinsen(STF) (Salvensen, et al., 1970)에 의해 개발된 스트립법으로 운동을 해석하고 이를 바탕으로 원거리(far-field) 기반의 모멘텀 보존법을 적용하여 부가저항을 계산하였다. Fig. 3은 전진속도 U로 진행하고 있는 선박에 대한 물체 고정 좌표계를 나타낸 그림이고, 선박 주위의 유동을 비압축성, 비점성유체, 비회전 유동으로 가정하면 속도포텐셜 (ϕ)은 다음의 경계 조건을 만족한다.

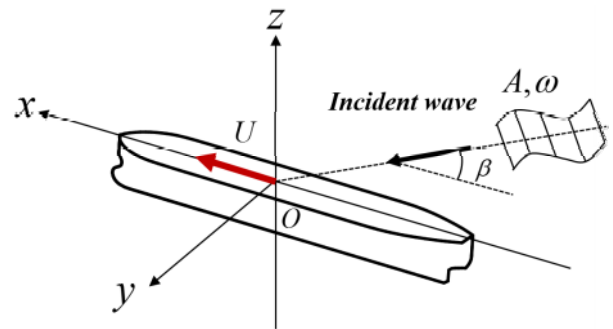


Fig. 3 Coordinate system

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

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

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

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

여기서 k=2는 좌우동요, k=3은 상하동요, ω_c 는 조우주파수, g

중력 가속도 및 n 은 물체 표면의 법선 방향을 의미한다. 이와 같은 2차원 경계치 문제를 풀기 위해서 파랑 그린 함수 (Newman, 1985)를 분포시켰으며, 파랑 그린 함수의 수치적인 계산을 위해서 NIIRID (Sclavounos, 1985)를 이용하였다. 이 프로그램은 2차원 유체역학 계수와 가진력을 계산한다.

부가저항을 추정하기 위해서는 원거리 계산 방법인 Maruo (1960)의 모멘텀 보존법을 적용하였다. 이 기법을 적용한 부가저항은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau > \frac{1}{4} \text{인 경우,}$$

$$R = 4\pi\rho \left(- \int_{-\infty}^{m_c} + \int_{m_d}^{\infty} \right) \times |H(m)|^2 \frac{(m + k_0\tau)^2 (m - k\cos\beta)}{\sqrt{(m + k_0\tau)^4 - m^2 k_0^2}} dm \quad (5)$$

$$\tau < \frac{1}{4} \text{인 경우,}$$

$$R = 4\pi\rho \left(- \int_{-\infty}^{m_c} + \int_{m_d}^{m_b} + \int_{m_a}^{\infty} \right) \times |H(m)|^2 \frac{(m + k_0\tau)^2 (m - k\cos\beta)}{\sqrt{(m + k_0\tau)^4 - m^2 k_0^2}} dm \quad (6)$$

여기서,

$$\tau = \frac{\omega_e U}{g}, k = \frac{\omega^2}{g}, k_0 = \frac{g}{U^2}, \omega_e = \omega - kU\cos\beta \quad (7)$$

$$m_a = \frac{k_0(1 - 2\tau + \sqrt{1 - 4\tau})}{2} \quad (8)$$

$$m_b = \frac{k_0(1 - 2\tau - \sqrt{1 - 4\tau})}{2}$$

$$m_c = -\frac{k_0(1 + 2\tau + \sqrt{1 + 4\tau})}{2}$$

$$m_d = -\frac{k_0(1 + 2\tau - \sqrt{1 + 4\tau})}{2}$$

$H(m)$ 은 Kochin function으로 다음과 같이 표현된다.

$$H(m) = \int_L \sigma(x) e^{imx} dx \quad (9)$$

$$\sigma(x) = -\frac{1}{4} \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \{ Z_T(x) B(x) \} \quad (10)$$

여기서 $B(x)$ 는 단면의 폭이고, $Z_T(x)$ 는 파에 상대적인 수직 변위이다.

하지만 이와 같은 방법을 단파장 영역에서 적용하는 것은 선

수부에서 산란되는 파가 비선형성이 강하기 때문에 정확한 계산에 어려움이 있다. 본 연구는 이를 보완하기 위해서 Fujii and Takahashi (1975)의 방법을 기반으로 한 일본의 National Maritime Research Institute(NMRI)의 식을 이용하였다. NMRI 식 (Kuroda, et al., 2008)은 다음과 같이 표현된다.

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

$$B_f(\beta) = \frac{1}{B} \left[\int_I \sin^2(\theta - \beta) \sin\theta dl + \int_{II} \sin^2(\theta + \beta) \sin\theta dl \right] \quad (11)$$

$$\alpha_d = \frac{\pi^2 I_1^2(k_e d)}{\pi^2 I_1^2(k_e d) + K_1^2(k_e d)}, \left(k_e = \frac{\omega_e^2}{g} \right)$$

$$1 + \alpha_U = 1 + C_U F_n$$

$$(C_U = \max[10.0, -310 B_f(\beta) + 68])$$

여기서 B_f 는 선박의 뒤편 정도를 나타내는 계수이며, α_d 는 수직한 벽의 반사계수, $1 + \alpha_U$ 는 선박의 전진속도의 영향을 고려한 보정계수이다. NMRI 식 (Kuroda, et al., 2008)의 반사계수와 전진속도에 대한 보정계수는 실험값을 이용하여 수정되었다. 적분구간 I, II은 입사파에 직접 노출된 영역을 나타내고, I_1 과 K_1 은 각각 수정된 1차 제 1종 Bessel 함수와 수정된 1차 제 2종 Bessel 함수를 의미한다.

불규칙파에서의 부가저항은 규칙파에서의 부가저항과 파랑 스펙트럼의 선형 중첩을 이용하여 계산할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R_{wave} = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{R_{wave}(\omega, \alpha)}{\zeta_a^2} E(\omega, \alpha; H, T, \theta) d\omega d\alpha$$

$$E(\omega, \alpha; H, T, \theta) = S(\omega; H, T) D(\alpha; \theta) \quad (12)$$

여기서 $R_{wave}(\omega, \alpha; V)$ 는 규칙파에서의 부가저항, $E(\omega, \alpha; H, T, \theta)$ 는 방향 스펙트럼, $S(\omega, H, T)$ 는 파 스펙트럼이다. 이때 IMO MEPC.1/Circ.796 (IMO, 2012)의 지침에 의하면, 대표해상상태에서의 파도와 바람의 방향은 속도 저감에 가장 큰 영향을 주는 선수방향으로 정의된다. 이를 식 (12)에 적용하면 불규칙파에서의 부가저항은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R_{wave} = 2 \int_0^\infty \frac{R_{wave}(\omega; V)}{\zeta_a^2} S_{\zeta_a}(\omega) d\omega \quad (13)$$

3.3 제동 마력 및 기상보정계수의 추정

선박의 저항이 추정된 후 프로펠러 단독실험을 통해 얻어진

프로펠러 단독특성을 이용하여 제동마력을 추정한다. 본 연구에서 사용된 제동마력 추정 방법은 ISO-15016 (2015)의 Direct Power Method를 적용하였고, 이는 ITTC (2011)에서 제안한 Resistance & Thrust Identity Method 방법과 동일하다. 이 방법은 파랑 중 프로펠러의 단독특성과 자항실험 데이터가 정수 중에서의 데이터와 동일하다고 가정한다. 이러한 가정으로 정수 중 상태에서 얻어진 프로펠러 단독특성 실험 결과를 이용하여 제동마력을 추정하였다. Fig. 4는 NMRI 프로펠러 모델의 프로펠러 단독특성 실험 결과 그래프 (Van, et al., 1998)로 전진비(JP)에 대한 추력계수(K_T), 토크계수(K_Q) 및 프로펠러 효율(η_0)을 나타내었다. 또한 전진비에 따른 추력계수를 이용하여 K_T/J_p^2 에 대한 곡선을 얻을 수 있다. 추력계수의 식을 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{K_T}{J_p^2} = \frac{1}{\rho_s V_s^2 D^2} \frac{R_T}{(1-t)(1-w_s)^2} \quad (14)$$

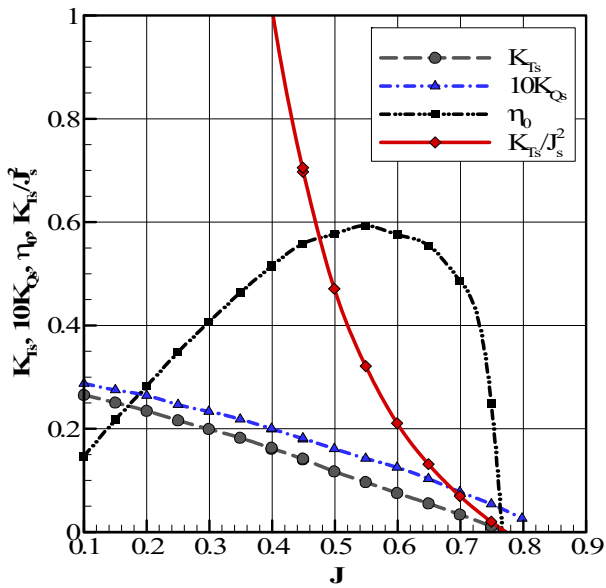


Fig. 4 Propeller characteristics chart

여기서 J_p 는 전진비, D 는 프로펠러의 직경, R_T 는 전체저항, t 는 추력감소계수, w_s 는 반류계수이다. 본 연구에서는 반류계수와 추력감소계수와 같은 프로펠러 추진 성능 계수들과 상대회전효율을 얻기 위해 자항실험 결과를 이용하였다. 선형 변환 후 기상보정계수를 추정하는 과정에서는 변화된 선형에 의해 추진 성능 계수 또한 변하기 때문에 이에 대한 수치 계산이 필요하다. 하지만 본 연구에서는 전체적인 기상보정계수의 추정 방안에 대해 제시하고, 주요 치수가 변화되었을 때 기상보정계수가 어떠한 경향성을 가지고 변화하는지 파악하는 것을 목적으로 하였기 때문에 Holtrop and Mennen (1982)의 마력 근사 방법을 이용하여 추진 성능 계수들을 추정하여 이용하였다. 추진성능 계수의 근사식은 다음과 같다.

$$w = c_9 C_V \frac{L}{T_A} \left(0.0661875 + 1.21756 c_{11} \frac{C_V}{(1-C_{P1})} \right) + 0.24558 \sqrt{\frac{B}{L(1-C_{P1})} - \frac{0.09726}{0.95-C_P} + \frac{0.11434}{0.95-C_B}} \quad (15)$$

$$t = 0.001979L/(B-BC_{P1}) + 1.0585c_{10} - 0.00524 - 0.1418D^2/(BT) + 0.0015C_{stern} \quad (16)$$

$$\eta_R = 0.9922 - 0.05908A_E/A_o + 0.07424(C_P - 0.0225lcb) \quad (17)$$

자항실험을 통해 얻어진 실험값이나 위 식들을 통해 얻어진 계수들과 총 저항을 식 (14)에 대입하면 K_T/J_p^2 을 얻을 수 있고, 얻어진 값과 K_T/J_p^2 곡선 사이의 보간법을 이용하여 전진비를 얻을 수 있다. 특정 속도에서의 전진비가 얻어지면 전진비와 프로펠러의 회전수 사이의 관계식인 식 (18)을 통해 회전수를 얻을 수 있다.

$$n_s = \frac{(1-w_s)V_s}{J_p D} \quad (18)$$

여기서 n_s 는 프로펠러의 초당 회전수, D 는 프로펠러의 직경이다. 최종적으로 제동마력은 식 (19)을 통해 얻을 수 있다.

$$P_D = \frac{2\pi\rho D^5 n_s^3 K_Q}{\eta_R}, \quad P_B = \frac{1}{\eta_s} P_D \quad (19)$$

이때 P_D 는 전달마력, η_R 은 상대회전효율, η_s 는 전달효율 그리고 P_B 는 제동마력을 의미한다.

4. 해석 결과

4.1 시험 대상 및 시험 조건

본 장에서는 본 연구에서 소개된 선박의 운항성능 예측 절차를 이용하여 선박의 저항과 기상보정계수를 추정하고, 이를 초기 선형설계에 적용하기 위해 선형변형에 따른 선박의 저항과 기상보정계수의 민감도를 확인하고자 한다. 선박의 운항성능 예측을 위한 시험 대상은 초대형 원유운반선인 KVLCC2(KRISO Very Large Crude Carrier 2)와 벌크선인 Supramax이다. 선형변형에 따른 민감도 해석은 KVLCC2에 대해 수행되었다. 대상 선형에 대한 주요 제원은 Table 2와 같고, Fig. 5는 KVLCC2와 Supramax 선형에 대한 정면도(body pan)를 나타낸 그림이다.

Table 2 Main particulars of ship geometry and propeller

Item	KVLCC2	Supramax
Ship type	Tanker	Bulk carrier
L_{BP} (m)	320.0	192.0
Beam (m)	58.0	36.0
Draft (m)	20.8	11.2
Displacement (m^3)	312,622	65,033
C_B	0.8098	0.8401
LCB, fwd+ (%)	3.48	5.83
Reference speed (knots)	15.5	14.5
Diameter (m)	9.9	6.0
Pitch ratio (0.7R)	0.721	0.722
Area ratio (A_E/A_D)	0.431	0.491
Thrust deduction factor ($1-t$)	0.816	0.804
Wake fraction factor ($1-w$)	0.583	0.673

LBP: length between perpendiculars; CB: block coefficient; LCB: longitudinal center of buoyancy.

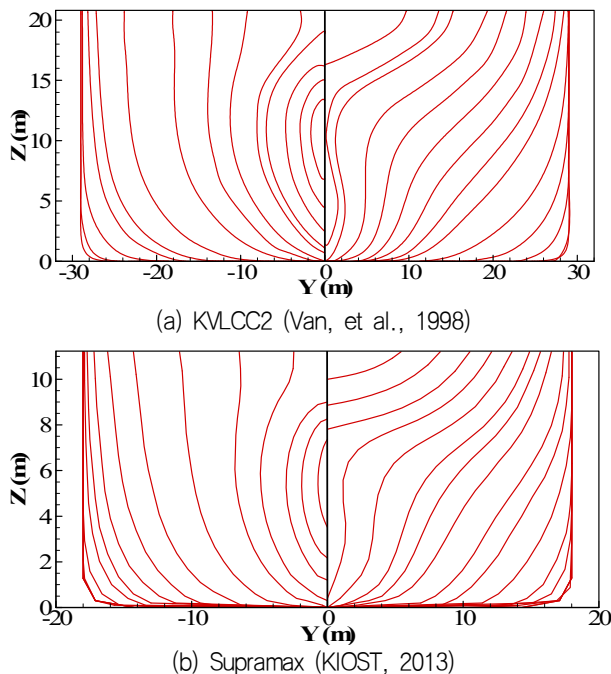


Fig. 5 Body plans under the still water level

EEDI 규정에 포함된 기상보정계수는 대표해상상태에서 정의된다. IMO MEPC.1/Circ.796 (IMO, 2012)에 정의된 대표해상상태는 Beaufort 6 상태로, 바람과 파의 방향은 속도 저감에 가장 큰 영향을 주는 선수 방향으로 정의된다. Table 3에 Beaufort 6 상태를 정리하였다.

Table 3 Representative sea condition

Sea condition	Beaufort 6
Mean wind speed (m/s)	12.6
Mean wind direction (deg)	180
Significant wave height (m)	3
Mean wave period (sec)	6.7
Mean wave direction (deg)	180

4.2 정수 중 저항

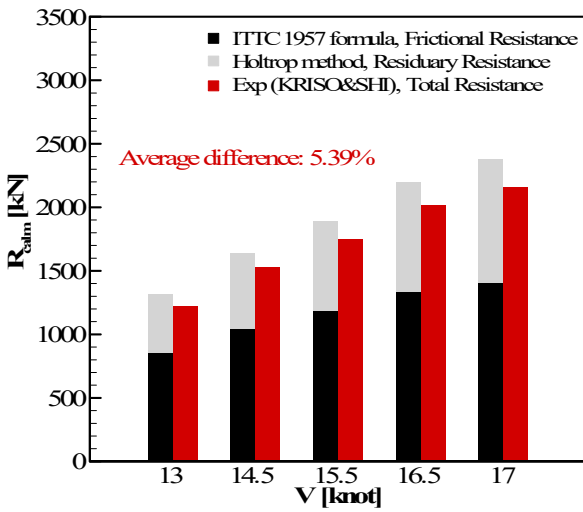
대표해상상태에서의 선박의 기상보정계수를 추정하기 위해서 먼저 특정 속도에서의 정수 중 저항을 계산해야 한다. 본 연구에서는 Holtrop and Mennen (1982)의 회귀식을 사용하여 정수 중 저항을 추정하였다. 하지만 Holtrop and Mennen (1982)의 방법을 사용할 수 있는 대상 선형은 제한적이기 때문에 Table 1을 (Manen and Oossanen, 1988) 이용하여 대상 선형의 주요 치수가 적용 가능한 범위에 만족되는지 확인하였다.

KVLCC2 선형의 경우에는 모든 조건을 만족하였으나, Supramax 선형의 경우 B/T가 3.21로 조건의 최고값보다 약간 큰 것이 확인되었다. 하지만 그 차이가 크지 않고 다른 조건들은 충분히 만족하기 때문에 본 연구에서는 두 가지 선형에 대해 Holtrop and Mennen (1982)의 방법을 사용하였다.

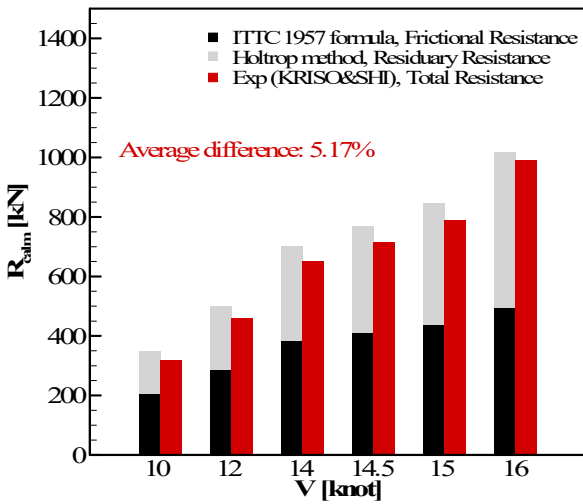
이 회귀식에서는 전체 저항이 마찰저항과 잉여저항으로 나눌 수 있다. Fig. 6는 특정 속도에서 KVLCC2와 Supramax의 마찰저항과 나머지 잉여저항의 계산 결과를 선박해양플랜트연구소 (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO)와 삼성중공업에서 수행한 실험 결과 (KIOST, 2013)를 비교한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 실험값과 계산값의 평균 차이는 KVLCC2의 경우 5.39%, Supramax의 경우 5.17% 정도 차이하는 것을 알 수 있다. Holtrop and Mennen (1982)의 방법의 경우 모형선-실선 보정에 의한 저항 RA값이 다소 크게 나타나는 경향이 있으며, 이로 인해서 전체 저항 값이 실험값에 비해서 크게 나타난다. 이는 Holtrop and Mennen (1982)의 방법이 다소 오래된 선형의 실험 데이터를 기반으로 추정하는 회귀식이기 때문에 상대적으로 최근의 선형에 대해 모형선-실선 보정이 잘 이루어지지 않기 때문이라고 판단된다. 추후 연구에서 최신 선형에 대한 모형선-실선 보정을 적용함으로써 정수 중 저항 추정에 대한 정확도를 높일 수 있을 것이라 생각된다.

4.3 파랑 중 부가저항

파랑 중 부가저항은 회절(diffraction) 성분과 선박의 운동에 의한(radiation) 성분으로 나눌 수 있는데, 이 중 선박의 운동에 의한 성분은 선박과 파 사이의 상대 운동이 커지는 부분에서 부가저항이 크게 나타난다. 따라서 선박의 운동에 대한 결과 분석이 먼저 수행되어야 한다. 선박의 운동을 예측하기 위해서 스트립 방법이 이용되었고, 대상 선박 중 KVLCC2에 대해 서울대학교



(a) KVLC2



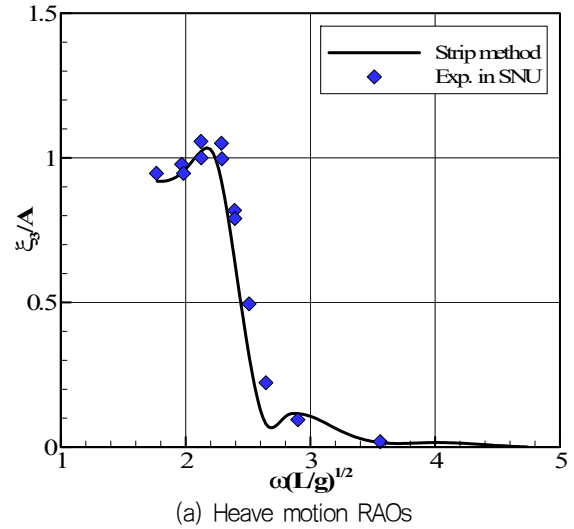
(b) Supramax

Fig. 6 Comparison of calm water resistance

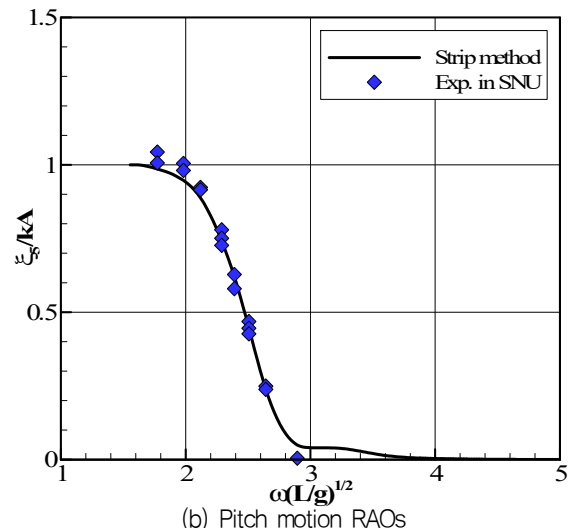
수조실험동에서 수행된 실험결과와 비교하였다. Fig. 7 (a)와(b)는 KVLC2 선형에 대한 $Fn=0.142$ 인 선수파에서의 상하동요와 종동요의 결과를 보여준다. x , y 축은 각각 무차원화 된 주파수와 상하, 종 변위를 나타내며, A 는 파 진폭을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이, 본 계산에서의 선박 운동이 실험결과와 전반적으로 비슷한 경향성을 보여주었다 (Park, et al., 2016).

Fig. 7 (c)는 단파장 영역 보정법을 적용하여 구해진 부가저항 결과를 보여준다. (x , y)축은 각각 무차원화 된 주파수와 부가저항 값을 나타내며, A 는 파 진폭을 의미한다. 그 결과를 살펴보면, 스트립 방법으로 계산한 결과에 단파장영역 보정법을 함께 적용한 계산결과와 거의 전체적으로 실험결과와 유사함을 확인할 수 있다. 이때, 실험결과가 단파장 영역에서 매우 분산되어 있음을 확인할 수 있는데, 이 이유는 부가저항 실험의 불확실성과 파고에 의한 비선형성이 부가저항의 크기에 영향을 주기 때문이다 (Park, et al., 2015). 또한 실험 결과보다 계산 결과가 단파장 영역에서 조금 크게 계산되었다. 본 연구에서는 단파장 영역에서의 부가저항을 보완하기 위해 NMRI 식을 사용하였는데, 스

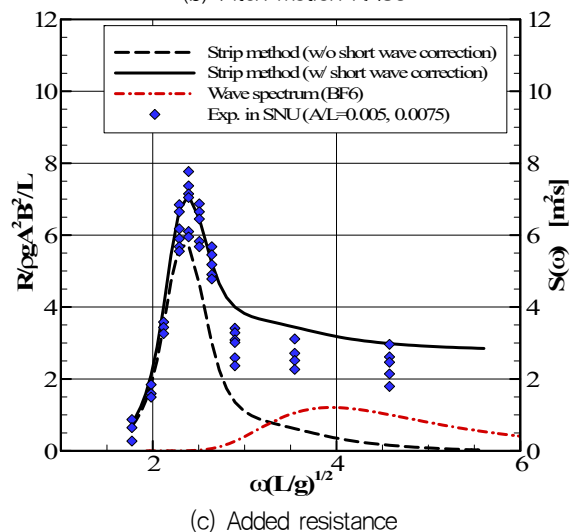
트립 방법을 통해 계산된 결과와 NMRI 식의 결과를 중첩하는 과정에서 약간의 중복이 발생하여 값이 크게 계산된 것이라 판단된다. 이는 추후에 보다 개선된 방법이 필요한 부분이다.



(a) Heave motion RAOs

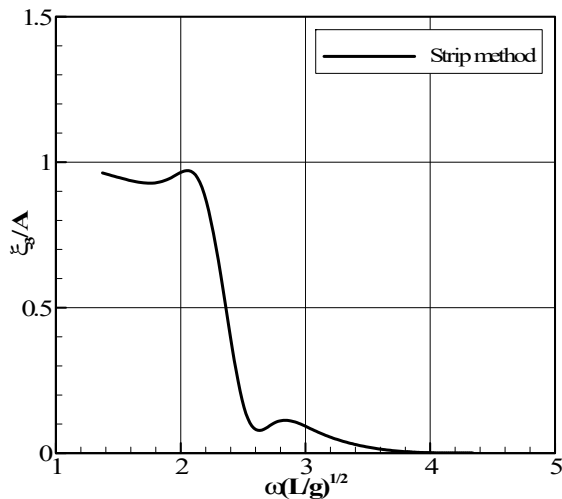


(b) Pitch motion RAOs

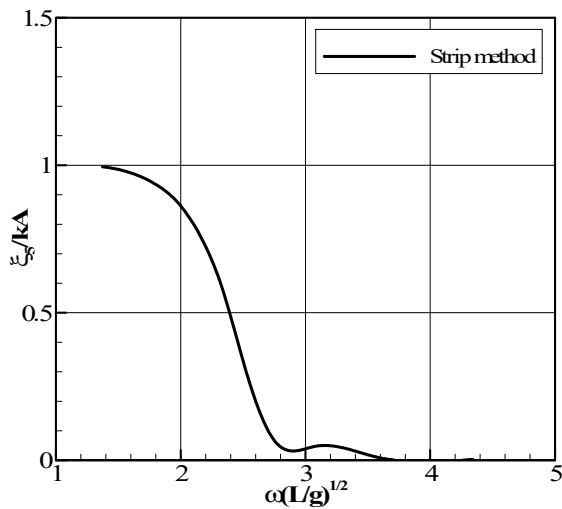


(c) Added resistance

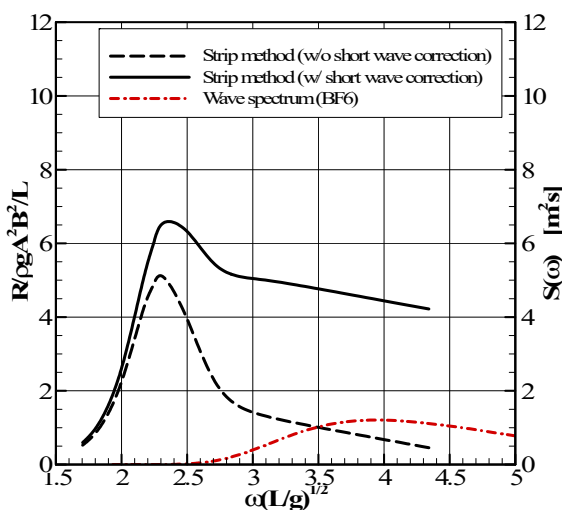
Fig. 7 Motion RAOs and added resistance in full load condition, KVLC2, $Fn=0.142$, $\beta=180^\circ$



(a) Heave motion RAOs



(b) Pitch motion RAOs



(c) Added resistance

Fig. 8 Motion RAOs and added resistance in full load condition, Supramax, $Fn=0.172$, $\beta=180^\circ$

Fig. 8 (a)와 (b)는 $Fn=0.172$ 인 선수파에서의 Supramax의 상

하동요와 종동요의 결과를 보여준다. 또한 Fig. 8 (c)는 Supramax의 단파장 영역 부가저항 보정법을 이용하여 계산한 방법과 보정법을 이용하지 않은 부가저항을 나타낸다. Supramax의 경우 단파장 영역에서의 부가저항 보정을 하였을 때, 그 크기가 KVLCC2의 경우 보다 더 큰 값을 가지게 되는 것을 확인할 수 있다. 이 이유는 단파장 영역에서 회절에 의한 성분이 지배적이고, 이 성분은 선박의 선수부의 형상과 선박의 뭉툭함(bluntness)에 크게 영향을 받는다 (Yang, et al., 2015). 따라서 선박의 뭉툭한 정도가 더 큰 Supramax($C_B=0.8401$)가 KVLCC2($C_B=0.8098$)보다 단파장 영역에서의 부가저항이 더 크게 예측되었다.

Fig. 7 (c)와 Fig. 8 (c)에서는 부가저항과 함께 대표해상상태의 파랑 스펙트럼을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 두 가지 대상 선박에 대한 Beaufort 6 상태의 파랑 스펙트럼의 최고값 위치는 단파장 영역에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 대상 선박에 대해서 단파장 영역에서의 부가저항 정확도가 불규칙파에서의 부가저항 정확도에 큰 영향을 주는 것을 의미한다. 따라서 단파장 영역에서의 부가저항 보정법이 중요하다 하는 것을 알 수 있다. 하지만 크기가 작은 선박의 경우에는 BF6 조건에서 파랑 스펙트럼의 최고값의 위치가 파장이 긴 쪽으로 변화하기 때문에 단파장 영역 이외의 영역 부가저항 계산 또한 중요하다고 할 수 있다.

4.4 대표해상상태에서의 기상보정계수

본 연구에서 제안된 절차를 이용하여 대상 선박에 대해 기상보정계수를 계산하였다. Fig. 9은 두 가지 대상 선박의 정수 중과 대표해상상태에서의 마력-속도 곡선을 보여준다. 그래프 안에서 빨간색 점선은 설계 속도에서의 정수 중 마력을 의미하고, 마력 곡선에서의 점들은 반복계산이 수행될 때 특정 속도에서의 마력을 의미한다. 즉, 한 곡선에서 4개의 점이 있는 경우는 반복계산이 4회 수행되었다는 것을 의미한다. 빨간색 점선 중 두 개의 곡선 사이의 간격은 대표해상상태에서의 속도 저감을 의미하고, 이 속도 저감을 설계 속도로 나눈 값이 기상보정계수이다.

Table 4는 각 선형에 대한 선박 저항, 총 저항 중 각 저항이 차지하는 비율 및 기상보정계수 추정 결과를 자세히 나타낸다. 표를 통해서 알 수 있듯이, Supramax의 경우 파랑에 의한 부가저항의 비율이 KVLCC2 보다 상대적으로 크다는 것을 확인할 수 있고, 이 결과는 앞서 논의했듯이 Beaufort 6의 경우 단파장에서의 부가저항이 큰 영향을 주고, Supramax의 경우 KVLCC2 보다 단파장 영역에서의 부가저항이 크게 나타나기 때문이다. 이때, 총 저항 중 부가저항의 비율은 기상보정계수의 값과 큰 연관성이 있는데, 그 이유는 기상보정계수는 실제 해상상태에서 바람과 파도에 의해 저항이 증가하여 발생하는 속도 저감을 의미하기 때문이다. 따라서 Supramax의 기상보정계수가 KVLCC2 보다 상대적으로 작다는 것을 예상할 수 있고, 이는 표에 나와 있는 결과와 일치한다.

두 가지 선형에 대해 기상보정계수를 추정해 보았을 때, 그 값의 범위가 약 0.7-0.9로 나타났고, 이는 EEDI 식에서 무시할 수 없는 정도의 값이다. 따라서 선박의 성능을 평가할 때에는 정수 중 상태만을 고려하기 보다는 실제 해상상태에서의 성능이 평가

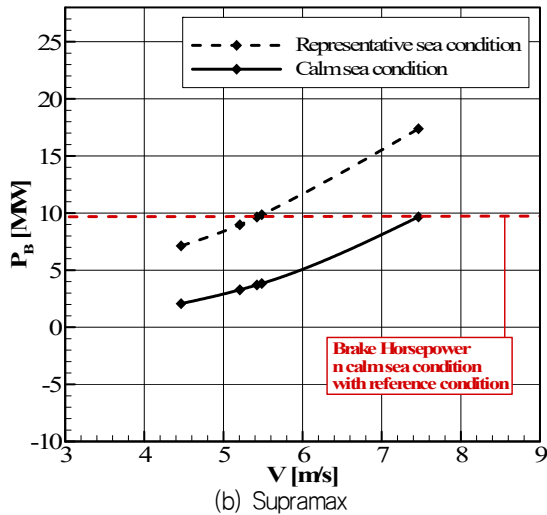
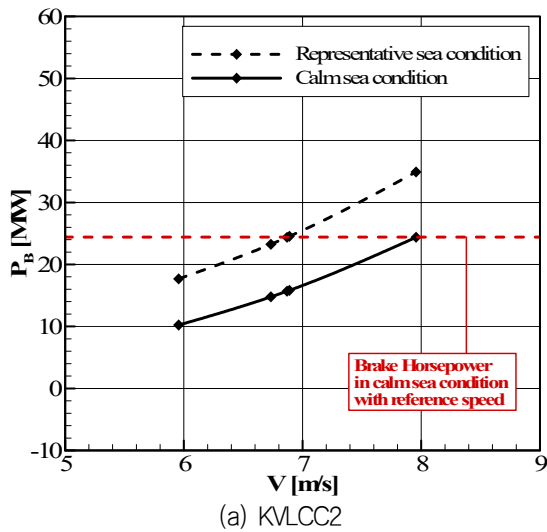


Fig. 9 Power-speed curve of test models

Table 4 Hull resistances and weather factors for test models

Ship	V_{ref}	V_w	
KVLCC2	V (m/s)	7.956	6.869
	R_{calm} (kN)	1943.118 (75.9%)	1460.967 (71.5%)
	R_{wave} (kN)	363.314 (14.2%)	351.525 (17.2%)
	R_{wind} (kN)	250.945 (9.9%)	231.746 (11.3%)
	P_B (MW)	24.376	
	f_w	0.863	
Suprama x	V (m/s)	7.465	5.524
	R_{calm} (kN)	827.468 (67.0%)	524.454 (59.3%)
	R_{wave} (kN)	299.583 (24.3%)	268.378 (30.3%)
	R_{wind} (kN)	107.531 (8.7%)	92.299 (10.4%)
	P_B (MW)	9.646	
	f_w	0.740	

되어야 한다. 또한 다양한 선종과 선형의 기상보정계수에 대한 데이터베이스가 있다면, 이는 선형설계의 과정에서 유용한 정보가 될 것이다.

4.5 선형설계로의 적용을 위한 민감도 해석

선박의 운항성능 예측 방법을 선형설계 단계에 적용하기 위해서 선형 변형에 따른 민감도 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 초기 선형설계 단계에 초점을 맞추었기 때문에, L_{BP} , B , C_p 와 같은 주요치수 변환을 수행하였다. 선박의 L_{BP} 와 B 는 선형 곡선의 모든 x 혹은 y 좌표에 α 혹은 β 를 곱하여 원하는 L_{BP} 와 B 를 얻는 방법으로 변환될 수 있다. C_p 변환은 $1-C_p$ 방법을 적용하였고, 이 방법은 횡단면의 위치를 이동시킴으로써 C_p 를 변형시킨다. 민감도 해석을 위한 대상 선박은 KVLCC2이고, 각 변수의 변화 범위는 Table 5에 첨부하였다. Fig. 10는 선형 변형 후 수선면 형상의 변화를 나타낸 그림으로, Fig. 10 (a)는 L_{BP} 변환 후 KVLCC2의 형상이고, Fig. 10 (b)는 C_p 변환 후의 형상이다. L_{BP} 변환의 경우 선수부의 형상에는 큰 변화가 없고, 길이방향으로 늘어나 L/B 가 커진 상태이다. C_p 변환의 경우 선수부 이외의 부분의 형상변화는 작다. 이러한 선형 변형을 이용하여 주요치수에 대한 정수 중 저항, 부가저항 및 기상보정계수에 대한 민감도 해석을 수행하였다.

Table 5 Test model and range of variables for sensitivity analysis

Test model	KVLCC2	
Range of Variables	$\alpha=L/L_0$	0.95~1.05
	$\beta=B/B_0$	0.95~1.05
	δC_p	-0.01~0.01

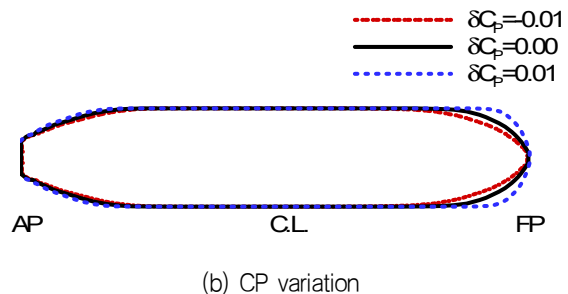
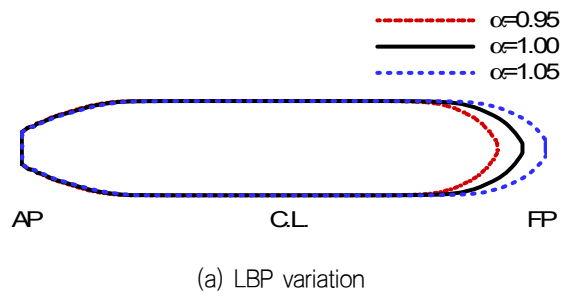
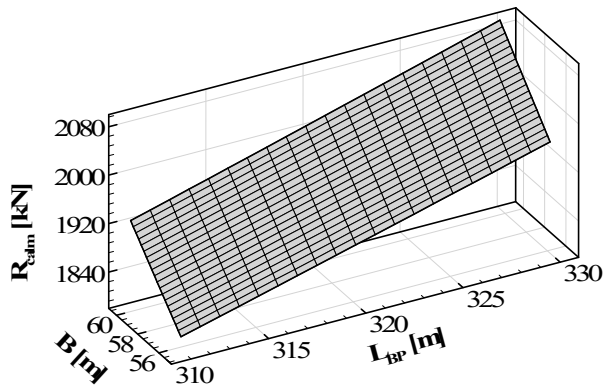
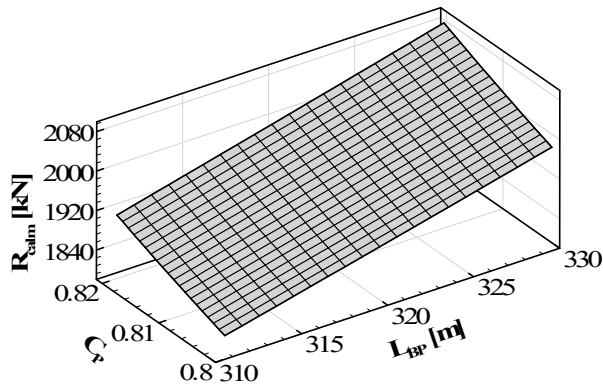


Fig. 10 Water plane after hull form variations



(a) LBP-B Variation



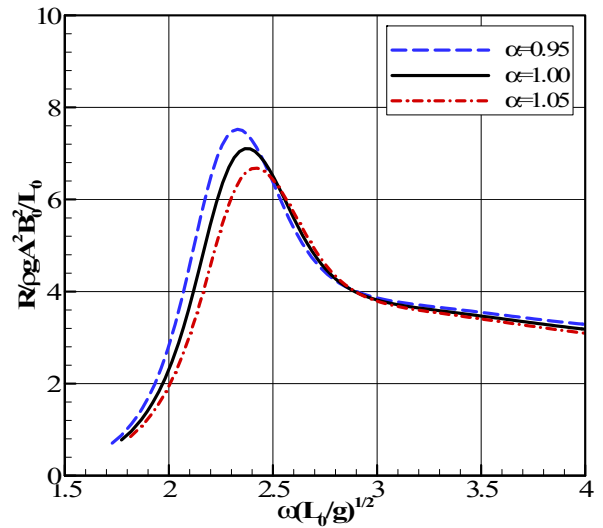
(b) LBP-Cp variation

Fig. 11 Results of calm water resistance after hull form variation, KVLCC2

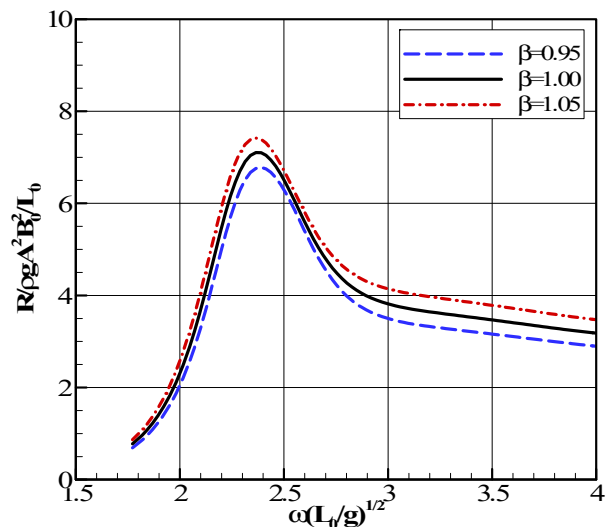
$$R_{calm} = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (20)$$

여기서 R_F 는 ITTC-1957 마찰저항 공식에 따른 마찰저항이고, $1+k_1$ 은 형상계수를 의미한다. R_W 은 조파저항을 의미하며, R_{APP} , R_B , R_{TR} , R_A 는 각각 부가물에 의한 저항, 구상선수에 의한 저항, 트랜섬 선미에 의한 저항 그리고 모형선-실선 보정에 의한 저항을 나타낸다. 일반적으로 마찰저항($R_F(1+k_1)$)과 조파저항(R_W)이 전체 저항의 대부분을 차지한다. 이때 선박의 형상에 변형이 있다면, 이는 선박의 접수표면적과 형상계수에 가장 큰 변화를 준다. 특히 접수표면적의 변화는 전체 저항의 크기에 큰 영향을 주므로 Fig. 11와 같이 L_{BP} , B , C_p 가 증가할 때 정수 중 저항의 크기도 커지게 되는 것이다.

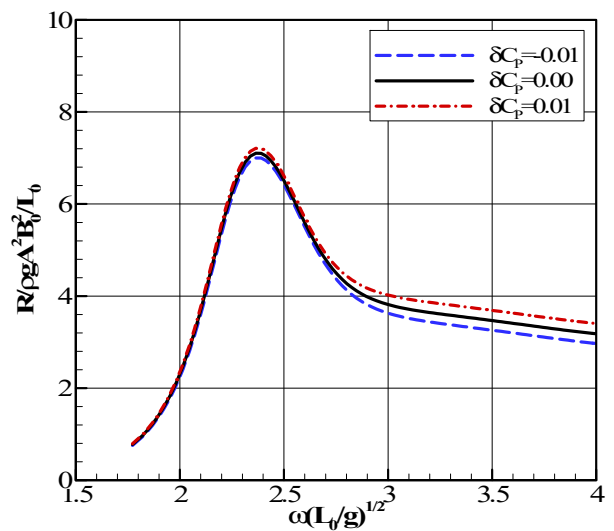
Fig. 12는 선형 변환 후 규칙파 중 부가저항의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 12 (a)는 L_{BP} 변환 후 부가저항을 나타내는 것으로, 최고값의 크기가 L_{BP} 가 작아질수록 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 선형이 더 뭉툭한 형태가 될수록 부가저항이 더 커지는 것을 의미한다. 또한 L_{BP} 가 작아질수록 최고값의 위치가 약간 왼쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 선박의 속도 변화 때문이다. 만약 선박의 길이가 감소한다면, 무차원화된 속도를 나타내는 Froude number(F_n)가 증가하고 이로 인해 조우 주



(a) LBP Variation



(b) B variation



(c) CP variation

Fig. 12 Results of added resistance in regular waves after hull-form variation, KVLCC2, $F_n=0.142$, $\beta=180^\circ$

파수가 감소하게 된다. 따라서 부가저항의 최고값의 위치는 저주파수의 영역으로 이동한다 (Seo, et al., 2013).

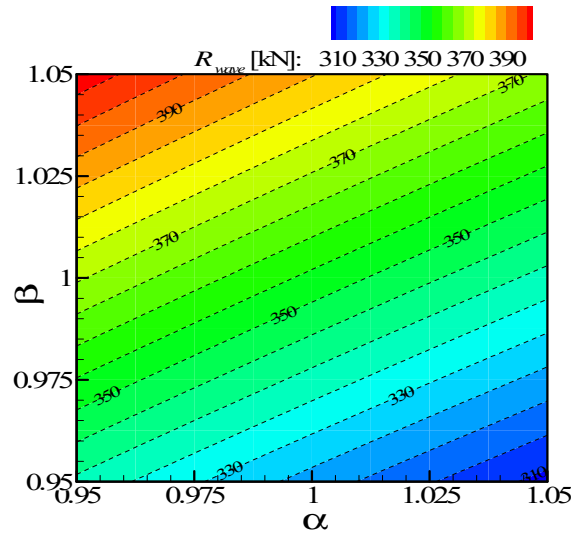
Fig. 12 (b)는 B 변환 후 규칙파 중 부가저항의 변화를 나타내는 그래프로, L_{BP} 변환과 마찬가지로 B가 증가하자 L/B가 작아지면서 부가저항의 최고값이 커지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 B 변환의 경우에는 단파장 영역에서도 부가저항의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 L_{BP} 변환의 경우 2차원 단면적의 위치를 조절함으로써 길이를 변화시키는데, B 변환의 경우 2차원 단면의 폭을 늘림으로써 선수부 형상의 변화가 있기 때문이다.

C_p 변환의 경우에는, Fig. 12 (c)를 통해 알 수 있듯이 C_p 가 증가할 때 저주파수 영역에서의 부가저항이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 저주파수 영역, 즉 단파장 영역의 경우 회절(diffraction) 성분이 지배적이고 이 성분은 앞서 말했듯이 선수부의 형상에 큰 영향을 받는다. 따라서 C_p 가 커질수록 선수부의 뒤틀린 정도가 커지게 되고 단파장 영역의 부가저항의 커지게 되는 것이다.

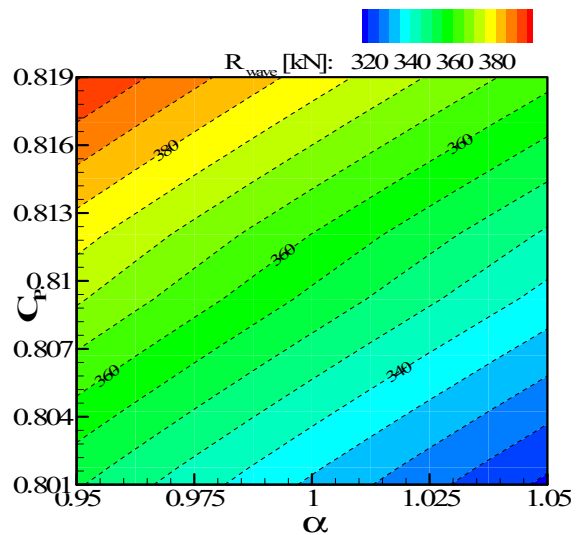
Fig. 13는 선형 변환 후 대표해상상태에서의 부가저항의 변화를 알아보기 위해 L_{BP} , B, C_p 변환 중 여러 가지 선형 변환 조합에 대한 결과를 나타내었다. Fig. 13의 축에 나타난 계수들 중 α 는 LBP 변환에서의 L/L0를 의미하고, β 는 B 변환의 B/B0를 의미한다. Fig. 13 (a),(b),(c)는 각각 L_{BP} -B 변환, C_p - L_{BP} 변환 및 C_p -B 변환 후의 불규칙파 중 부가저항의 크기를 나타낸다. Fig. 13 (a),(b)에서 L_{BP} 변환의 경우 L_{BP} 가 증가할 때 부가저항의 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 L_{BP} 가 증가할 때 선박의 접수면적과 배수량이 증가함에도 불구하고 L/B가 큰 더 날씬한 선박이 되면서 부가저항이 작아지는 것을 알 수 있다. 같은 관점에서 B의 변화에 따른 불규칙파 중 부가저항의 크기 변화를 살펴보면, B가 증가할 때 L/B가 작아지기 때문에 부가저항 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. C_p 변환의 경우 C_p 가 증가하면 단파장 영역에서 부가저항이 증가하기 때문에 불규칙파 중에서도 C_p 가 증가하자 부가저항의 크기가 증가함을 확인할 수 있다.

또한 각각의 변환에 대한 부가저항 변화량의 크기를 살펴보면, B 변환의 경우 $\pm 5\%$ 의 변화를 주었을 때 부가저항의 변화가 가장 크게 나타났다. C_p 변환의 경우 변화 범위 내에서 L_{BP} 와 B 변환에 비해 상대적으로 부가저항의 변화가 작게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 부가저항의 변화 경향성을 통해 세 가지 변환 중 B 변환이 기상보정계수의 변화에 부가저항의 영향이 가장 클 것임을 예상할 수 있다.

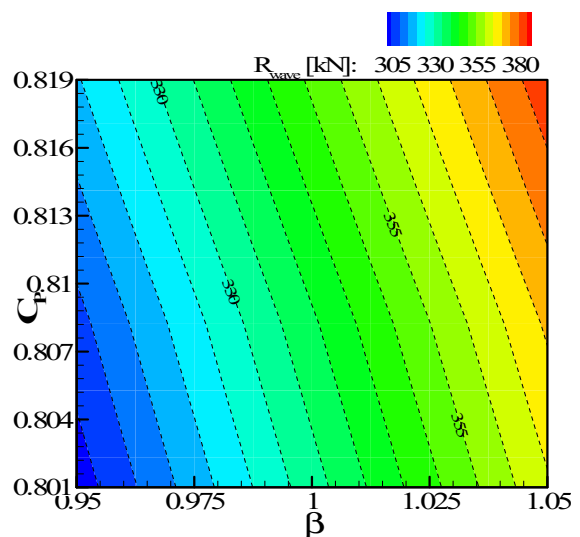
일반적으로 대표해상상태 중 부가저항의 크기가 커지면 속도-마력 그래프에서 정수 중 마력과 부가저항이 포함된 마력의 차이가 커지기 때문에 기상보정계수 또한 커짐을 예상할 수 있다. 하지만 선형을 변화시킬 때 반류계수와 추력계수 등 프로펠러의 추진 성능이 변화하기 때문에 기상보정계수를 추정할 때 속도-마력 곡선의 기울기 또한 영향을 준다. 따라서 기상보정계수의 변화를 분석하기 위해서는 부가저항 뿐만 아니라, 프로펠러의 추진 성능 및 속도-마력 곡선의 기울기에 영향을 주는 회전수(n)와 토크 항($n^3 \cdot K_Q$)에 대한 변화도 파악해야한다.



(a) Added resistance after LBP-B Variation



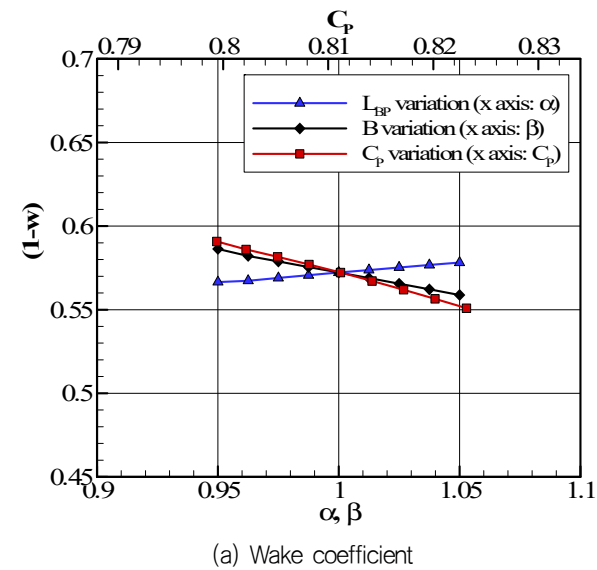
(b) Added resistance after LBP-CP variation



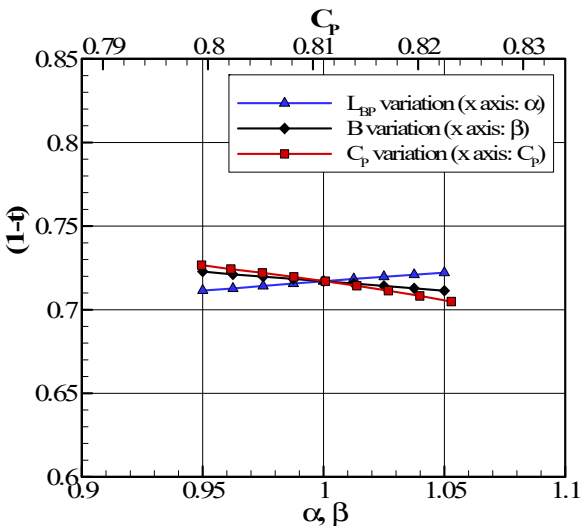
(c) Added resistance after B-CP variation

Fig. 13 Results of added resistance in the representative sea condition after hull-form variation

프로펠러의 추진 성능의 경우 Holtrop and Mennen (1982) 방법을 사용하였고, 선형 변환에 따른 속도-마력 그래프의 변화는 마력을 추정하는 과정에서 확인할 수 있다. Fig. 14는 L_{BP} , B 및 C_p 변환에 따른 반류계수(1-w)와 추력감소계수(1-t)의 변화를 나타낸 그래프이다. L_{BP} 변환의 경우, B와 C_p 변환과 달리 α 가 커질 때 반류계수(1-w)와 추력감소계수(1-t)가 증가하는 것을 확인할 수 있고, B와 C_p 변환은 LBP의 경향과 반대임을 확인할 수 있다. 이러한 추진계수들은 프로펠러의 회전수(n)를 결정하는데 영향을 주고, 최종적으로 제동마력과 비례하는 항인 $n^3 \cdot K_Q$ 항이 회전수와 토크계수에 의해 결정된다.



(a) Wake coefficient



(b) Thrust deduction coefficient

Fig. 14 Propulsion factors after hull-form variation by using Holtrop and Mennen method

Fig. 15는 선형 변환에 따른 $n^3 \cdot K_Q$ 항을 나타낸 그래프이다. 먼저 LBP 변환의 결과를 살펴보면, α 가 커질 때 $n^3 \cdot K_Q$ 항이 커지는 것을 확인할 수 있다. 이 원인에 대해 살펴보면, α 가 커지는 경우

전체 저항 중 큰 비율을 차지하는 정수 중 저항의 증가로 전체 저항(R_T)은 증가하게 된다. 이 때, 식 (14)에 따르면 전체 저항이 커지는 경우 K_T/J_p^2 의 크기가 커지게 되고, Fig. 4의 K_T/J_p^2 곡선에서 이에 대응되는 전진비(J_p)는 작아지고 추력계수(K_Q)는 증가하게 된다. 따라서 α 가 커지는 경우 $(1-w)/J_p$ 에 비례하는 회전수(n)와 추력계수(K_Q)가 모두 증가하기 때문에 $n^3 \cdot K_Q$ 항이 증가한다.

B와 C_p 변환의 경우, β 와 C_p 가 커질 때 부가저항과 정수 중 저항 모두 증가하여 전체 저항(R_T)과 K_T/J_p^2 가 증가한다. 이로 인해 대응되는 전진비(J_p)는 작아지고, Fig. 14(a)에 따르면 반류계수(1-w) 또한 작아지기 때문에 B와 C_p 변환의 경우 반류계수와 전진비(J_p) 변화의 경쟁을 통해 $(1-w)/J_p$ 에 비례하는 회전수가 증가하는지 감소하는지가 결정된다. Fig. 15의 결과를 살펴보면 세 가지 변환에 대해 $n^3 \cdot K_Q$ 항이 증가함을 확인할 수 있고, 결과적으로 $n^3 \cdot K_Q$ 항을 결정할 때에 저항의 증가가 큰 영향을 주었다고 말할 수 있다.

Fig. 16은 선형변환에 대하여 기상보정계수를 계산한 결과이다. LBP 변환과 B 변환의 경우 기상보정계수의 변화 경향성이 부가저항의 변화 경향성과 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 B 변환은 부가저항의 변화가 크기 때문에 기상보정계수를 결정하는 데에 큰 영향을 주었다는 것을 의미한다. 또한 L_{BP} 변환의 경우는 Fig. 15에서 $n^3 \cdot K_Q$ 항, 즉 속도-마력 곡선의 기울기의 변화가 크지 않은 것으로 확인되었기 때문에 부가저항의 경향성을 따라간 것으로 판단된다. C_p 변환의 경우에는 부가저항의 변화 경향성과 달리 L_{BP} 와 B 변환의 결과에 비해 상대적으로 기상보정계수의 변화가 크지 않음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 확인한 추진성과 속도-마력 곡선의 변화에 영향을 주는 $n^3 \cdot K_Q$ 항의 변화가 상대적으로 크기 때문이다. 하지만 속도-마력 곡선의 형태는 $n^3 \cdot K_Q$ 항만으로 판단하기 어렵고, 프로펠러의 추진 성능을 계산하는 방법이 엄밀한 계산이 아닌 통계적인 회귀식을 사용하였기 때문에 이에 대해 추후 좀 더 엄밀한 방법으로 대체된 연구가 필요한 부분이다.

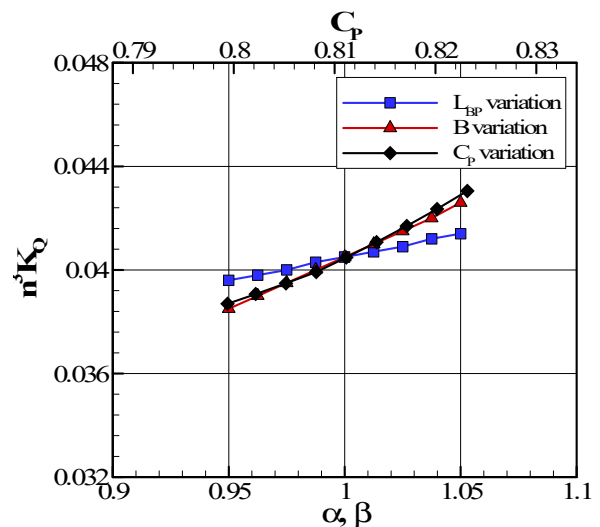


Fig. 15 A factor for brake horse power prediction after hull-form variation

5. 결론

본 연구에서는 파랑 중 선박의 운항성능을 예측하기 위한 효율적인 절차와 수치해석을 위한 방법을 소개하였다. 수치해석은 KVLCC2와 Supramax 선형에 대해 수행하였으며, KVLCC2 선형의 주요치수 변화에 따른 부가저항과 기상보정계수의 민감도를 확인하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 내리고자 한다.

본 연구에서 구해진 선박의 운동과 부가저항은 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. 특히, 선박의 대형화에 따라 단파장 영역에서의 부가저항 예측이 중요하므로 대표해상상태에서의 기상보정계수를 추정하기 위해서는 단파장 영역 부가저항 보완법이 중요하다.

본 연구에서 소개된 수치해법들을 적용한 운항성능 예측 절차는 계산시간의 효율성을 확인하였고, 두 가지 대상 선박에 대해 기상보정계수를 추정했을 때 약 0.7~0.9 정도의 값을 갖는 것을 확인하였다. 따라서 선형 설계의 과정에서 이에 대한 추정이 필요하다.

선형설계 단계로의 적용을 위한 민감도 해석 수행한 결과, L/B가 작은 경우 선형의 비대 정도가 커져 부가저항의 최고값이 커지는 것을 확인하였고, CP가 커지는 경우 선수부의 형상이 뭉툭해지기 때문에 단파장 영역에서의 부가저항이 커지는 것을 확인하였다. 하지만 기상보정계수의 경우에는 부가저항 뿐만 아니라 프로펠러의 추진성능에 의해 결정되기 때문에 프로펠러 추진계수 변화에 따른 회전수 변화에 크게 영향을 받는 것을 확인하였다. 따라서 파랑 중 선박의 성능 예측을 위해서는 파랑 중 부가저항과 프로펠러의 추진성능이 함께 분석되어야 함을 알 수 있다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 산업기술혁신사업 ‘선박의 운항 효율 향상을 위한 부가저항이 고려된 선형설계 향상 기술 개발’ (과제번호: 10062881) 및 로이드 기금(Lloyd’s Register Foundation) 연구센터의 지원으로 수행되었음을 밝히며, 지원기관들에게 감사를 드립니다. 그리고 서울대학교 선박해양성능고도화 사업단(AMEC)과 해양시스템연구소(RIMSE)의 행정지원에도 감사드립니다.

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.
- Chuang, Z. & Steen, S. 2013. Speed loss of a vessel sailing in oblique waves. *Ocean Engineering*, 64, pp.88-99.

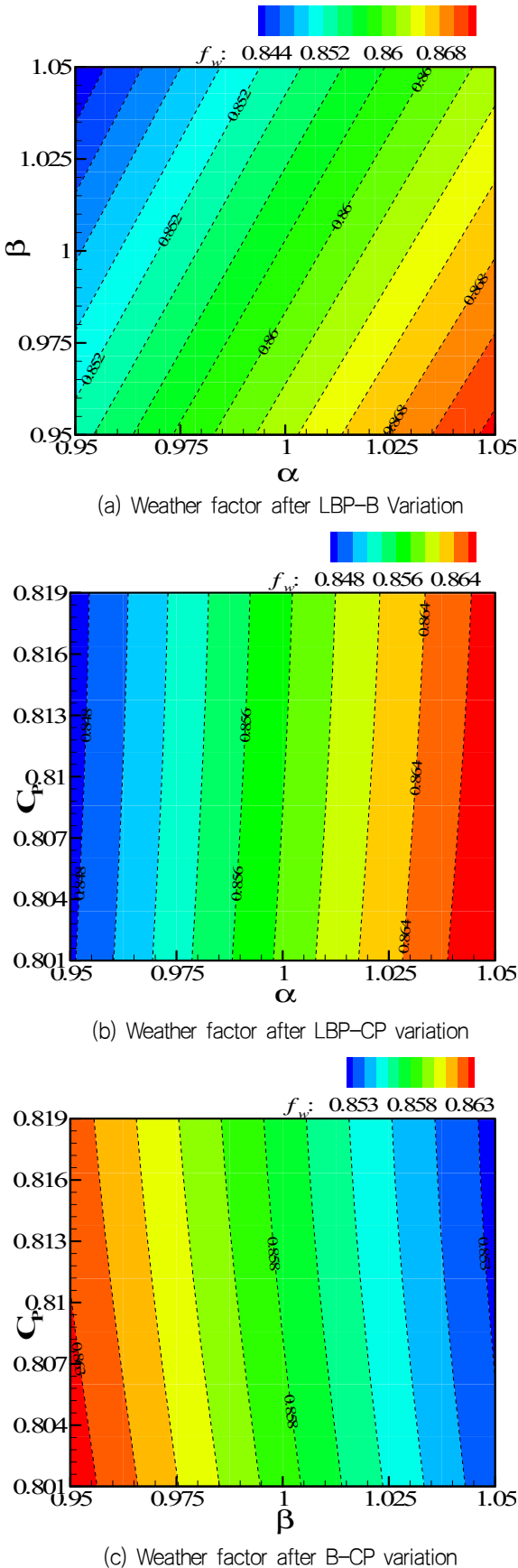


Fig. 16 Results of weather factor in the representative sea condition after hull-form variation

- Faltinsen, O.M. Minsaas, K.J. Liapis, N. & Skjrdal, S.O., 1980. Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway. *13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, Japan, 6–10 October 1980.
- Feng, P.Y. Ma, N. & Gu, X.C., 2010. Long-term prediction of speed reduction due to waves and fuel consumption of a ship at actual seas. *29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, China, 6–11 June 2010.
- Fujii, H. & Takahashi, T., 1975. Experimental study on the resistance increase of a ship in regular oblique waves. *14th International Towing Tank Conference*, Ottawa, Canada, September 1975, pp.351–360.
- Fujiwara, T. Ueno, M. & Ikeda, Y., 2006. Cruising performance of a large passenger ship in heavy sea. *16th International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, California, USA, 28 May – 2 June 2006.
- 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.
- Grigoropoulos, G.J., 2004. Hull form optimization for hydrodynamic performance. *Marine Technology*, 41(4), pp.167–182.
- Holtrop, J. & Mennen, G.G.J., 1982. An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*, 29, pp.166–170.
- IMO, 2012. *Interim guidelines for the calculation of the coefficient f_w for decrease in ship speed in a representative sea condition for trial use*. IMO MEPC.1/Circ.769.
- ISO, 2015. *Ships and marine technology – guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data*. ISO 15016: 2015.
- ITTC, 2011. *Prediction of power increase in irregular waves from model test*. ITTC – Recommended Procedure 7.5–02–07–02.2.
- Joncquez, S.A.G., 2009. *Second-order forces and moments acting on ships in waves*. Ph.D Thesis. Technical University of Denmark.
- Journee, J.M.J., 1992. *Experiments and calculations on 4 wigley hull forms in head waves*. Delft: Delft University of Technology Technical Report No 0909.
- Kashiwagi, M. Takehiro, I. & Takuma, S., 2010. Effect of forward speed of a ship on added resistance in waves. *Journal of Offshore and Polar Engineering*, 20(3), pp.196–203.
- 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 Engineering*, 8, pp.171–176.
- Kim, H. Hong, C. Lee, G. & Kim, B., 2015. Prediction of added resistance of a ship in waves using computational fluid dynamics. *Annual Autumn Meeting*, Jeju, Korea, 21–23 May 2015.
- 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 on ships by using a time-domain rankine panel method. *Ocean Engineering*, 38, pp.1357–1367.
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), 2013. *Development of the key technology for a ship drag reduction and propulsion efficiency improvement*. Korea: KIOST.
- Manen, J.D.van & Oossanen, P.van, ed. E.V. Lewis, 1988. *Principles of naval architecture*. Society of Naval Architects and Marine Engineers: New Jersey.
- Maruo, H., 1960. The drift of a body floating on waves. *Journal of Ship Research*, 4(3), pp.1–10.
- Newman, J.N., 1967. The drift force and moment on ships in waves. *Journal of Ship Research*, 11, pp.51–60.
- Newman, J.N., 1985. The evaluation of free-surface green function. *4th international conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, Washington D.C., USA, 24–27 September 1985.
- Park, D.M. Lee, J. & Kim, Y., 2015. Uncertainty analysis for added resistance experiment of KVLCC2 ship. *Ocean Engineering*, 95, pp.143–156.
- Park, D.M. Kim, Y. Seo, M.G. & Lee, J., 2016. Study on added resistance of a tanker in head waves at different drafts. *Ocean Engineering*, 111, pp.569–581.
- Prpic-Orsic, J. & Faltinsen, O.M., 2012. Estimation of ship speed loss and associated CO2 emissions in a seaway. *Ocean Engineering*, 44, pp.1–10.
- Salvesen, N. Tuck, E.O. & Faltinsen, O.M., 1970. Ship motions and sea loads. *Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers*,

- 78, pp.250–279.
- Salvesen, N., 1978. Added resistance of ship in waves. *Journal of Hydronautics*, 12(1), pp.24–34.
- Sclavounos, P.D., 1985. *User's manual of NIIRID*, MIT Report. Cambridge: MIT.
- Seo, M.G. Park, D.M. Yang, K.K. & Kim, Y., 2013. Comparative study on computation of ship added resistance in waves. *Ocean Engineering*, 73(5), pp 1–15.
- Tasrief, M. & Kashiwagi, M., 2014. Improvement of ship performance based on sensitivity study to the added resistance. *24th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Busan, Korea, 15–20 June 2014.
- 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.
- Van, S.H. Kim, W.J. Yim, G.T. Kim, D.H. & Lee, C.J., 1998. Experimental investigation of the flow characteristics around practical hull forms. *3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design*, Osaka, Japan, 25–27 May, 1988.
- Yang, K.K. Seo, M.G. & Kim, Y., 2015. Analysis of added resistance in short waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(4), pp.338–348.
- Zalek, S.F. Parsons, M.G. & Beck, R.F., 2009. Naval hull form multicriterion hydrodynamic optimization for the conceptual design phase. *Journal of Ship Research*, 53(4), pp.199–213.

