



KSUPRAMAX-O 선형의 규칙파 중 상대파고 계측에 대한 연구

박동민¹·권용주^{1,2,†}·김건우¹·남현승³·황승현¹
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹
서울대학교 조선해양공학과²
한국표준과학연구원³

A Study on Relative Wave Elevation Measurement of KSUPRAMAX-O in Regular Waves

Dong-Min Park¹·Yong-Ju Kwon^{1,2,†}·Gun Woo Kim¹·Hyunseung Nam³·Seunghyun Hwang¹
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University²
Korea Research Institute of Standards and Science³

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 study focuses on measuring the relative wave elevation around the KSUPRAMAX-O ship and comparing it with numerical analysis results (potential and computational fluid dynamics). The relative wave elevation is a good indicator of the pressure distribution on the ship's surface, which is affected by the ship's motion, incident waves, and distributed waves. Prior to measuring the relative wave elevation, a comparative test was conducted on resistance type, capacitance type, and ultrasonic type wave probe to measure the relative wave elevation, and it was confirmed that the resistance type wave probe was suitable for measuring the relative wave elevation. A model test was performed at low speed and design speed using resistance type wave probe and compared with the results of numerical analysis result. As for the motion response, it was confirmed that the result of experiments and the result of the numerical analysis were in good agreement. The relative wave elevation showed a similar trend between the experiment and the computational fluid dynamics, but the potential analysis result showed a difference from the experiment in design speed.

Keywords : KSUPRAMAX-O(KRISO Supramax Original), Seakeeping(내항성능), Wave Probe(파고계), Relative Wave Elevation(상대파고), Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학)

1. 서론

전통적으로 내항성능 및 부가저항 해석은 포텐셜 기반의 프로그램이 많이 활용되었으며, 최근 고성능 컴퓨팅(HPC, high performance computing)과 전산유체역학(computational fluid dynamics)의 급격한 발전으로 파랑 중 선박의 내항성능 및 부가저항 해석에 전산유체역학이 많이 도입되고 있다. 지금까지 대부분의 포텐셜 해석 및 전산유체역학 해석 방법 검증은 전역(global) 거동에 해당하는 6자유도 운동응답, 전체 부가저항에 해당하는 부가저항 계수들을 비교하는 것이었다. 그러나 이러

한 전역 데이터 해석 결과가 해석 프로그램의 유효성을 반드시 보장하는 것은 아니다. 선박의 내항성능과 부가저항은 선박 주변 유동의 변화에 따른 선체 표면의 압력에 의해서 결정된다. 따라서 선체 표면의 압력을 비교하는 것이 가장 좋은 프로그램 검증 방법이나 모형시험에서 선체 표면의 압력을 계측하는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 모형시험에서 비교적 계측하기 쉬운 선체 주변의 상대파고를 계측하고 수치해석 결과와 비교하였다. 상대파고는 선박의 운동과 입사파, 교란파의 영향을 반영하는 것으로 상대파고를 비교하는 것은 전역 거동과 더불어 입사파, 교란파의 비교도 포함하고 있다. 또한 부가저항의

이론적인 해석을 살펴보면, 부가저항에서 상대파고가 지배적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다 (Kim and Kim, 2010). 따라서 상대파고 결과는 선박 주변의 국부적인 유동, 운동응답, 부가저항 해석 결과를 검증하는데 유용하게 활용될 수 있다.

정수 중 선박 주위의 파형(wave pattern)을 계측한 연구는 선박의 조파저항을 연구하는 분야에서 많이 진행되었다. Oliveri et al. (2007)은 DTMB 5415 선박 주위의 파형을 서보식 파고계와 용량식 파고계를 이용하여 계측하였으며 선박 주위의 쇄파에 대해서 연구하였다. Kim et al. (2001)은 3가지 선박(KCS, KVLCC, KVLCC2)에 대해서 서보식 파고계를 이용하여 파형을 계측하였다. 또한 Van et al. (2003)은 카메라와 서보식 파고계를 이용하여 KLNG 선박의 파형을 계측하였다. 수치해석 분야에서도 선박 주의 파형에 대한 많은 연구가 수행되었으며 Kim et al. (2009)은 KLNG 선박에 대해서, Kim et al. (2023)은 KCS 선박에 대해서 주변 유동을 수치해석하고 모형 시험 결과와 비교하였다. 이러한 정수 중 파형을 계측하는 연구는 정상(steady) 상태의 유동을 계측하는 것으로, 본 연구에서 다루는 비정상(unsteady) 상대파고의 계측과는 다른 측면이 있다. 비정상 상대파고를 계측한 연구로, Gui et al. (2001, 2002)은 서보식 파고계를 이용하여 DTMB 5512 주변 파고를 계측하고, 계측결과의 불확실성 해석을 수행하였다. Maury et al. (2003)은 저항식 파고계를 이용하여 파형을 계측하고 수치 해석 결과와 비교하였다. Kashiwagi (2013)은 선체 주변의 파고를 계측하고 계측된 파고를 이용하여 부가저항 해석을 수행하였다. Kim et al. (2017)은 LNGC 선박에 대해서 용량식 파고계를 이용하여 상대파고를 계측하고 수치해석 결과와 비교하였다. Lee (2018)은 파랑 중 전진하는 선박의 선체 주위 교란 파를 비접촉식 초음파 파고계를 이용하여 계측하였다. 선행 연구들을 살펴보면 상대파고를 계측하기 위해서 다양한(비접촉식 초음파, 서보식, 용량식, 저항식) 종류의 파고계를 사용한 것을 확인할 수 있다. 그러나 사용된 파고계의 특성에 관해서는 자세하게 기술되어 있지 않은 경우가 대부분이다.

본 연구에서는 상대파고를 계측하기 전에 파고계의 특성을 확인하는 모형시험을 진행하였으며 이를 바탕으로 모형선의 상대파고를 계측하기 위한 파고계로 저항식 파고계를 선정하였다. 저항식 파고계를 이용하여 KSUPRAMAX-O 선박에 대해서 모형시험을 수행하고 운동응답과 상대파고의 크기와 위상을 분석하였다. 그리고 두 가지 수치해석 프로그램(포텐셜 & 전산유체역학)을 이용하여 운동응답과 상대파고를 해석하고 모형시험 결과와 비교하였다. 본 시험 결과는 포텐셜 및 전산유체역학을 이용한 선박의 운동응답, 부가저항해석의 비교 및 검증하는데 유용하게 사용될 것으로 예상된다.

2. 파고계

상대파고 계측을 위해서 파고계 특성 비교 실험, 파고계 설

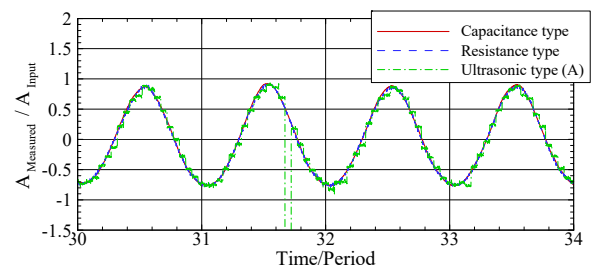
치 방법, 파고계 비선형 교정 방법에 대한 연구를 수행하고 그 결과를 아래에 정리하였다.

2.1 파고계 특성 비교 실험

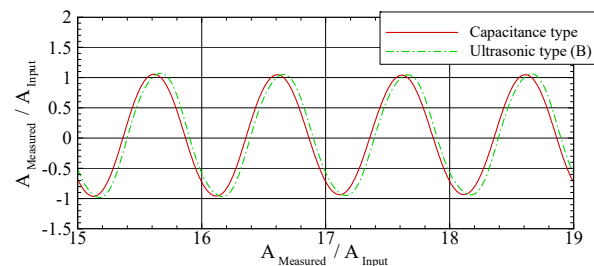
선체 표면의 상대파고 계측을 위해서 파고계의 특성을 파악하는 것이 필요하다. 입사파의 파고나 상대파고를 계측하기 위해 사용되는 파고계는 접촉식과 비접촉식 파고계로 나누어진다. 접촉식 파고계에는 서보식, 저항식, 용량식이 대표적이며 비접촉식 파고계는 초음파식이 대표적인 파고계이다. 본 연구에서는 상대파고계측을 위해서 모형선 선체에 파고계를 설치하여야 한다. 따라서 기계부가 크고 무거운 서보식 파고계는 제외하였으며 저항식, 용량식, 초음파식 파고계의 특성을 살펴보았다. Table 1은 파고계의 사양을 보여준다. 초음파식 파고계는 2가지 종류가 있는 것으로 파악이 되었으며 샘플링 수 제한(sampling rate limit)이 있는 것과 응답 시간의 지연(response time delay)이 있는 것이다. 본 연구에서는 2가지 종류의 초음파 파고계를 모두 사용하였다.

Table 1 Comparison of wave probe characteristics

Item	Capacitance type	Resistance type	Ultrasonic type (A)	Ultrasonic type (B)
Linearity	0.5 %	0.1 %	0.2 %	0.3 %
Range	~ 1,000 mm	~ 1,000 mm	100 mm ~ 3,000 mm	200 mm ~ 2,000 mm
Sampling rate limit	-	-	20 Hz	-
Response time	-	-	-	250 ms



(a) Comparison of wave probe



(b) Comparison of wave probe

Fig. 1 Time series of regular waves

파고계의 특성을 파악하기 위한 실험은 선박해양플랜트연구소(KRISO)의 2차원 수조에서 진행되었다. 파고계에서 계측되는 값과 실제 파고의 비교를 위해서 2차원 수조 벽면에 격자를 설치하고 고속카메라로 촬영을 하여 계측값과 비교하였다. 파고계는 서로 상호간섭이 없도록 설치하였다.

Fig. 1은 규칙파를 100 Hz로 계측한 파의 시계열을 나타낸 것이다. 규칙파 계측 조건에서 용량식 파고계와 저항식 파고계는 서로 잘 일치하는 경향을 보여주었다. 반면 수면위로 발사된 초음파가 수면에서 반사되어 되돌아오는 시간을 이용하여 거리를 측정하는 초음파 파고계는 파고계의 측정 방법으로 인해서 2가지 특성이 나타났다. 첫째, 파 기울기가 커지거나 수면이 매끄럽지 않으면 수면에서 반사된 초음파 신호가 파고계로 되돌아오지 않아서 계측 신호를 잃어버리는 현상이 발생하였다. Fig. 1(a)에서 31주기와 32주기 사이를 보면 계측 신호를 잃어버리는 현상을 볼 수 있으며 steep wave를 계측할 때도 유사한 현상이 발생하였다. 이는 초음파 파고계에서 계측할 수 있는 파 기울기 한계를 계측하는 파가 넘어서기 때문에 발생하는 것이다. 둘째, 초음파 파고계는 샘플링 수의 제한 또는 응답 시간의 지연 현상이 발생하였다. 샘플링 수의 제한은 Fig. 1(a)에서 확인할 수 있으며 응답 시간의 지연 현상은 Fig. 1(b)에서 확인할 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 초음파 파고계에서 생성된 초음파 신호가 수면에 반사되어 되돌아오는 시간에 의해서 발생하는 것이다. 초음파 파고계의 계측 신호를 잃어버리는 현상, 샘플링 수의 제한, 응답 시간의 지연은 본 연구에서 계측하고자하는 선체 표면의 상대파고를 계측하기에는 적합하지 않은 것으로 보여진다.

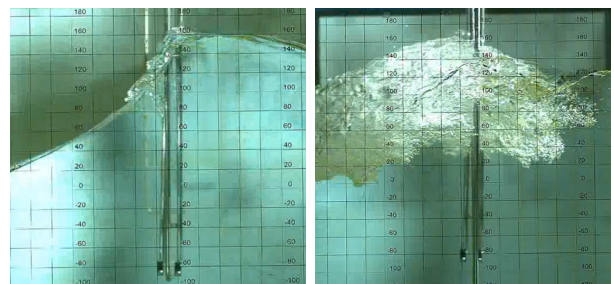
본 연구의 대상 모델은 벌크선(bulk carrier)로 속도가 빠르지 않지만 함정, 컨테이너선(container ship)과 같이 속도가 빠른 선박의 경우 어깨파 부근에서 쇠파 현상이 발생한다(Olivieri et al. 2007). 쇠파 현상이 발생하는 조건에서 파고계의 특성을 살펴보기 위해서 기울기가 큰 steep wave와 쇠파 현상이 발생하는 breaking wave에서 파고 계측 실험을 수행하였다. Fig. 2에서 (a)는 steep wave를 고속카메라로 촬영한 장면을 보여준다. Steep wave 조건에서 계측한 시계열을 Fig. 3(a)에 나타내었다. 고속카메라로 촬영한 장면과 직접적인 비교를 위해서 무차원화를 수행하지 않았다. Steep wave 조건에서 용량식 파고계와 저항식 파고계가 계측한 값은 큰 차이를 보이지 않았으며 고속카메라로 촬영한 장면의 격자에서 확인한 값과 유사한 값을 보여주었다. 반면 초음파식 파고계는 파 기울기가 커서 계측 신호를 잃어버리는 현상을 보였다. 쇠파가 발생하는 조건에서 고속카메라로 촬영한 장면을 Fig. 2(b)에 나타내었고 계측된 시계열을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 쇠파가 발생해서 기포가 많이 발생하는 조건에서 용량식 파고계의 값이 저항식 파고계의 값보다 크게 계측되었다. 고속카메라로 촬영한 장면을 보면 기포를 포함하면 수면의 높이는 약 0.15 m 이고 기포를 제외하면 수면의 높이는 약 0.09 m인 것을 확인

할 수 있다. 용량식 파고계는 기포를 포함한 높이와 유사한 0.15 m로 계측되었으며 저항식 파고계는 기포를 제외한 높이와 유사한 0.09 m로 계측되었다. 이러한 차이가 2차원 수조내 공간상의 차이에서 발생하는 현상인지 살펴보기 위해서 파고계의 위치를 변경하여 반복 실험을 수행했을 때 동일한 결과를 얻었다. 용량식 파고계는 쇠파와 같이 기포가 발생하는 파도에 대해서 기포를 일부분 포함하여 계측하며 저항식 파고계는 기포가 발생한 부분을 잘 계측하지 못하는 것으로 보인다. 쇠파가 발생할 때 용량식 파고계와 저항식 파고계의 계측값의 차이는 두 파고계의 특성에 의해서 발생하는 것으로 보인다. 그 원인을 파악하는 것은 본 연구의 범위를 벗어나는 것이고 본 연구에서는 상대파고를 계측할 때 이러한 파고계의 특성을 고려하는 것이 필요하다.

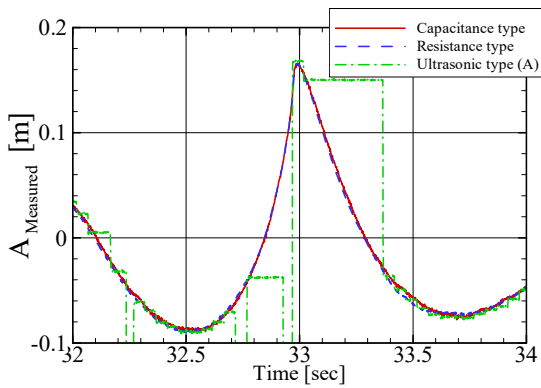
2.2 파고계 설치 방법

상대파고 계측을 위해서는 모형선 선체에 파고계를 설치해야 한다. 선체에 파고계를 설치하는 방법은 두 가지가 있다. 첫째 선체에 지그(jig)를 설치하고 Fig. 4와 같이 지그를 이용하여 파고계를 설치하는 방법이다. 가장 간단한 방법이지만 지그로 인해서 주변 파랑 장의 교란이 발생하고 저항의 증가가 예상된다. 이를 확인하기 위해서 Fig. 5와 같이 지그를 선박 양쪽 측면에 3개씩 부착하고 정수 중 저항을 계측하였다. 그리고 지그의 영향을 파악하기 위해서 지그가 없는 조건에서 정수 중 저항을 계측하였다. 정수 중 저항 결과를 Table 2에 정리하였다. 지그가 없는 조건에서 정수 중 저항은 참고 값(reference value)과 유사한 값을 보여주었다. 그러나 지그를 설치하는 경우 저항이 약 15 % 증가하였다.

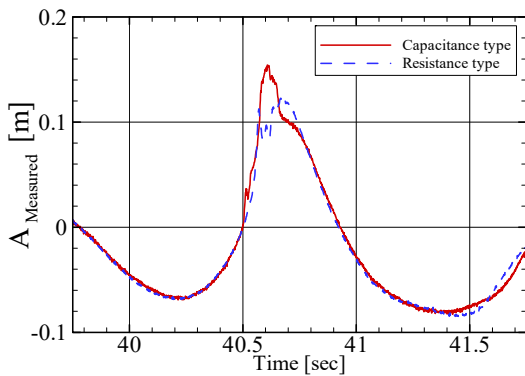
두 번째 방법은 Fig. 4와 같이 파고계의 검출선을 선체 표면에 바로 부착하는 것이다. 용량식 파고계는 검출선이 teflon 선이기 때문에 선체 표면에 부착하기 위해서 아주 얇은 테이프를 이용해서 부착하였다. 반면 저항식 파고계는 검출선이 도체이면 가능하기 때문에 동박 테이프를 바로 선체 표면에 부착하였다. 본 모형시험에서 사용하는 동박 테이프는 폭이 5 mm이고 두께가 0.06 mm이다. 선체 표면은 직선이 아니기 때문에 선체 표면에 부착된 파고계의 교정을 수행할 때 주의가 요구된다.



(a) Snapshot of steep wave (b) Snapshot of breaking wave
Fig. 2 Snapshot of steep wave and breaking wave



(a) Time series of steep wave



(b) Time series of breaking wave

Fig. 3 Measurement of steep wave and breaking wave

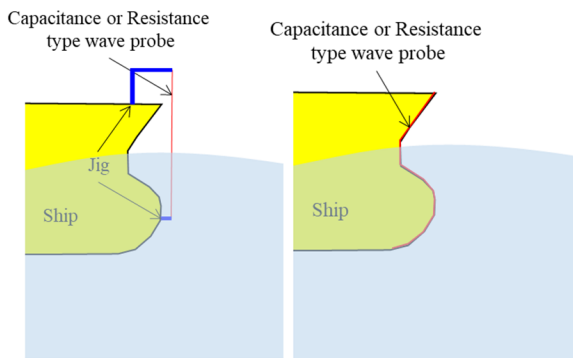


Fig. 4 Methods of attaching wave probe around hull

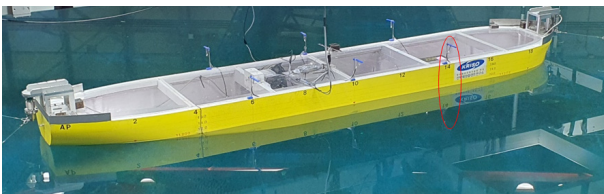


Fig. 5 Installation of wave probe around hull

Table 2 Resistance in calm water

Item	C _{tm} [10 ⁻³]	Error[%]
Reference	4.718	-
w/RW	5.440	15.31
w/o RW	4.729	0.23

파고계의 설치 방법이 계측값에 영향을 미치지 파악하기 위해서 평판에 용량식 파고계와 저항식 파고계를 설치하고 Fig. 6와 같이 리프트를 움직여서 각각의 파고계에서 계측된 값을 살펴보았다. 리프트를 0.2 m 움직였으며 그때 계측된 시계열을 Fig. 7에 나타내었다. 붉은 실선으로 나타낸 것이 용량식 파고계의 결과이고 청색 실선으로 나타낸 것이 저항식 파고계의 결과이다. 평판이 아래로 내려갈 때 두 파고계는 유사한 값을 보여주었다. 그러나 평판이 위로 올라갈 때 두 파고계는 차이를 보였다. 저항식 파고계는 리프트가 처음 위치로 돌아왔을 때 원점으로 돌아왔으나 용량식 파고계는 리프트가 처음 위치로 돌아왔을 때 원점으로 돌아오지 않았다. 용량식 파고계는 충분한 시간이 지난 후에 원점으로 되돌아 왔다. 용량식 파고계가 다시 원점으로 돌아오는데 시간이 걸리는 이유는 평판 표면에 설치된 파고계 주변에 남아있는 물 때문에 발생하는 것이다. 파랑 중 상대파고의 계측은 파의 주기로 진동하는 값을 계측해야한다. 따라서 용량식 파고계의 이러한 현상은 선체 표면에 부착해서 상대파고를 계측하는 것에는 적합하지 않는 것으로 보여진다.

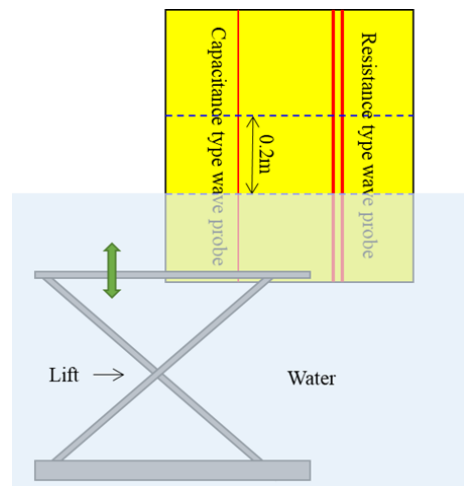


Fig. 6 Wave probe calibration using lift

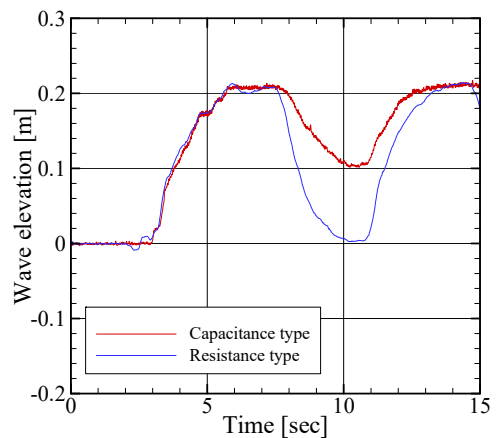


Fig. 7 Measurement of wave probe calibration data

2.3 파고계 교정(calibration)

일반적으로 설치하는 파고계는 검출선이 직선의 형태이기 때문에 선형성을 이용하여 파고계 교정을 수행한다. 그러나 선체 표면에 부착된 파고계는 곡면을 가지고 있기 때문에 하나의 교정 상수로 파고계 교정을 수행할 수 없다.

곡면에 설치한 파고계 교정은 파고계를 설치한 선체 표면의 곡선 길이를 이용하는 방법과 Fig. 8과 같이 기준 파고계를 설치하고 기준 파고계에서 측정된 파고와 선체 표면에 측정된 파고계의 전압을 매칭하는 방법이 있다. 본 연구에는 기준 파고계를 활용하는 방법을 이용하여 선체 표면에 설치된 파고계의 교정을 수행하였다. Fig. 9(a)는 파고계 교정을 수행하기 전 측정된 값의 시계열을 나타낸 것이다. 리프트가 완벽하게 일정한 속도로 움직이는 것은 아니기 때문에 기준 파고계의 값이 시간 축에 대해서 직선은 아니다. 선체 표면에 측정된 파고계의 전압을 매칭하는 방법은 가장 기본적인 방법을 이용하였다. Fig. 9(a)에 나타낸 것과 같이 선체 표면에 측정된 파고계의 전압과 기준 파고계에서 얻은 파고를 일대일로 매칭하였다. 즉, Fig. 9(a)에서 왼쪽 축으로 나타낸 전압과 오른쪽 축으로 나타낸 파고를 매칭하였다. 상대파고는 7개의 지점에서 측정하였으며 측정 지점에 대해서는 뒤에서 자세하게 설명할 것이다. 측정된 상대파고는 파고계가 설치된 위치의 곡면에 따라서 기울기가 변하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)는 파고계 교정 후 시계열을 나타낸 것이고, Table 3는 피어슨 상관계수(pearson correlation coefficient)와 최대 오차(maximum error)를 나타낸 것이다. Table 3로부터 상대 파고와 기준 파고계의 값이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

지금까지 살펴본 파고계의 특성, 설치 방법, 교정 방법을 고려하여 본 실험에서는 아래와 같이 파고계를 이용하여 상대파고를 측정하였다. 파고계는 저항식 파고계를 사용하였으며 설치 방법은 선체 표면에 바로 부착하는 방법을 이용하고 파고계의 교정은 리프트에서 기준 파고계와 상대파고계의 전압을 매칭하는 방법을 사용하였다.

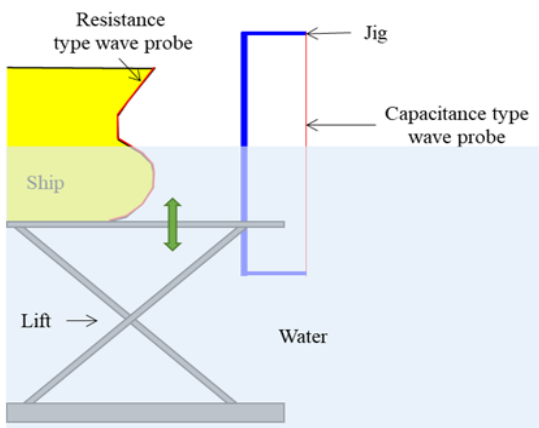
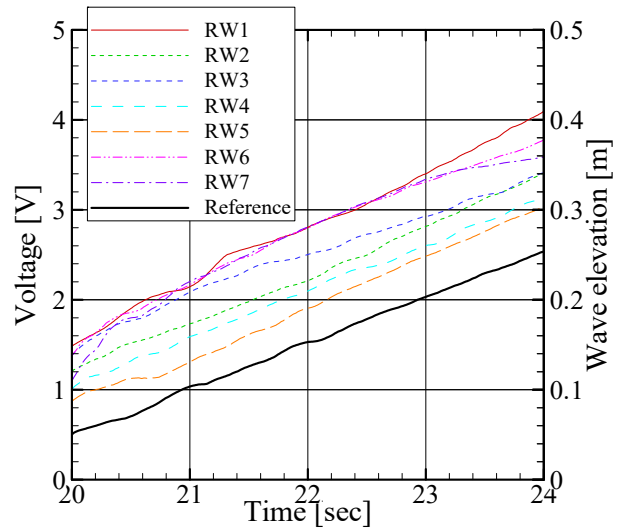
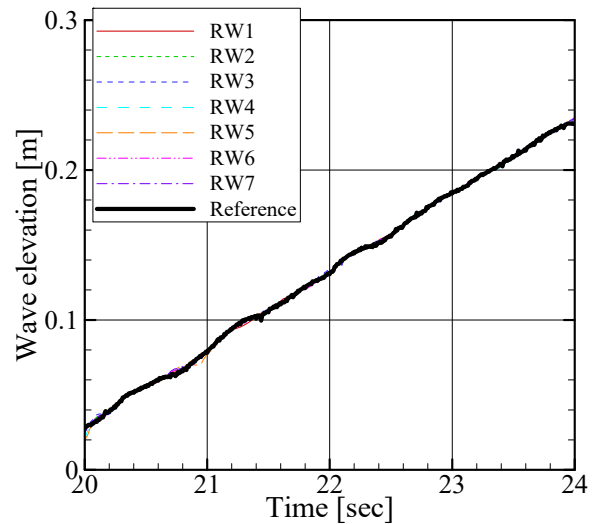


Fig. 8 Nonlinear wave probe calibration method



(a) Before calibration of wave probe



(b) After calibration of wave probe

Fig. 9 Data from wave probe calibration

Table 3 Correlation coefficient and maximum error of calibration data

Item	Pearson correlation*	Max. error**
RW1	0.99969	0.00802
RW2	0.99975	0.00812
RW3	0.99969	0.00817
RW4	0.99972	0.00845
RW5	0.99966	0.00817
RW6	0.99973	0.00819
RW7	0.99971	0.00805

* Pearson correlation coefficient =

$$\frac{\sum(RW_i - \overline{RW})(Reference_i - \overline{Reference})}{\sqrt{\sum(RW_i - \overline{RW})^2 \sum(Reference_i - \overline{Reference})^2}}$$

** Max. error = $Max(RW_i - Reference_i)$

3. 모형시험

3.1 해양공학수조

모형시험은 선박해양플랜트연구소(KRISO) 해양공학수조(OEB, Ocean Engineering Basin)에서 수행되었다. 해양공학수조는 길이 56 m, 폭 30 m, 깊이 3.2 m이며 규칙파 및 불규칙파를 생성할 수 있다. 모형시험에서 모형선은 soft-spring을 이용하여 설치하였으며 soft-spring의 제원은 Table 4와 같다.

3.2 대상 선형

대상 선형은 공개선형인 KSUPRAMAX-O(KRISO bulk carrier original)이다. 모형선은 해양공학수조의 크기와 파도 생성 조건을 고려하여 1/55 스케일의 FRP(Fiber-Reinforced Plastic)로 제작하였다. Fig. 10은 모형선을 나타낸 것이고 주요제원은 Table 5에 정리하였다.

Table 4 Soft-spring information

Item	Spring stiffness [N/m]	Pretension [N]	Position1 [m]	Position2 [m]
M1	198.78	135.72	1.912,0,0.131	3.28,1.96,0.131
M2			1.912,0,0.131	3.28,-1.96,0.131
M3			-1.912,0,0.131	-3.28,-1.96,0.131
M4			-1.912,0,0.131	-3.28,1.96,0.131



Fig. 10 KSUPRAMAX-O model ship

Table 5 Principal dimensions of KSUPRAMAX-O

Item	Ship	Model
Scale ratio	1	1/55
LBP [m]	192.0	3.491
B [m]	36.0	0.655
T [m]	11.2	0.204
∇ [m ³]	65,028	0.391
LCB [m]	5.773	0.105
KG [m]	7.020	0.128
GM [m]	8.586	0.156
kxx [m]	14.4	0.262
kyy, kzz [m]	48.0	0.873

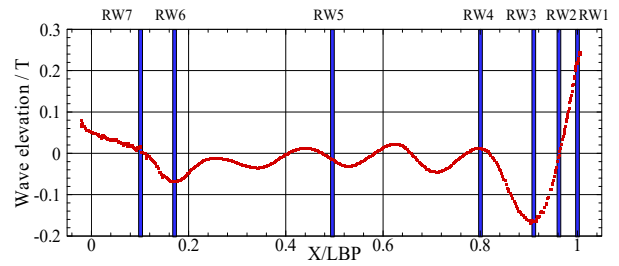


Fig. 11 Position of relative wave probe

Table 6 Position of relative wave probe

Item	X position from AP / LBP
RW1	1.000
RW2	0.957
RW3	0.917
RW4	0.800
RW5	0.500
RW6	0.172
RW7	0.100

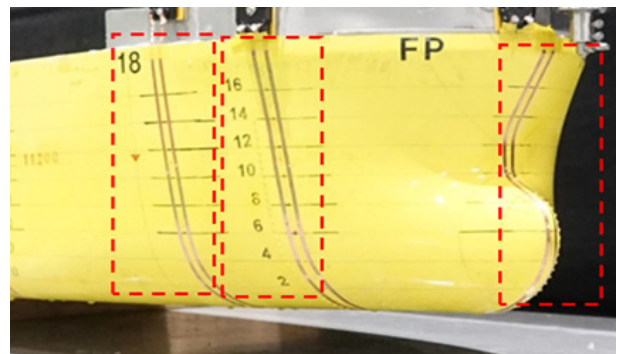


Fig. 12 Wave probe attached to the hull surface

3.3 상대파고 계측 위치

상대파고의 계측 위치는 전산유체역학 해석 결과를 바탕으로 선정하였다. Fig. 11에서 붉은색 점으로 나타낸 것이 전산유체역학으로부터 얻은 설계 속도($Fr = 0.172$)에서 정수 중 선체 표면의 wave profile이다. 이로부터 상대파고 계측 위치 7개를 선정하였다. 계측위치는 Table 6에 정리하였으며 Fig. 12는 저항식 파고계를 모형선에 설치한 것이다.

3.4 모형시험 조건

상대파고 계측 시험은 규칙파 조건에서 수행되었으며 모형시험 조건을 Table 7에 정리하였다. 모형시험은 저속 조건(4 knots, $Fr=0.047$)과 설계 속도 조건(14.5 knots, $Fr=0.172$)에서 수행되었다. 방향은 선수파 조건에서 수행되었고 파고는 선박 길이의 1/100으로 고정하였다. 파장비(λ/L)는 0.3 ~ 1.5

Table 7 Regular wave test condition

Speed [Fr]	Heading angle [deg.]	Wave height [H/L]	Wave length [λ/L]
0.047	180.0	1/100	0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.85, 1.0, 1.1, 1.2, 1.35, 1.5
0.172			0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.85, 1.0, 1.1, 1.2

사이의 10개의 파장비 조건에서 모형시험을 수행하였다. 파장비 1.5 이상에서 모형시험을 계획하였으나 반사파의 영향을 받는 것이 확인되어 실험 조건에서 제외하였다.

4. 수치해석

본 연구에서 운동응답 및 상대파고 해석을 위해서 두 가지 다른 수치해석 프로그램을 이용하였다. 첫 번째 프로그램은 선박해양플랜트연구소에서 개발한 포텐셜 기반의 AdFLOW (Advanced analysis system for FLOating body in Waves using higher-order element method)이다. 두 번째 프로그램은 상용프로그램인 STAR-CCM+이다.

4.1 포텐셜 해석

AdFLOW는 3차원 고차경계요소법(HOBEM, High Order Boundary Element Method)을 기반으로 KRISO에서 개발한 주파수 영역 내향성능 해석 프로그램이다. Zero-speed Wave Green function을 이용하기 때문에 전진 속도를 반영하기 위해서 조우주파수 및 Neumann-Kelvin 선형화 경계조건을 적용하였다. 따라서 엄밀하게 전진속도를 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다. Fig. 13은 포텐셜 해석에 사용한 패널을 나타낸 것이다.

4.2 전산유체역학

운동응답 및 상대파고 해석을 위해 사용한 두 번째 수치해석 기법은 전산유체역학(computational fluid dynamics)이다.

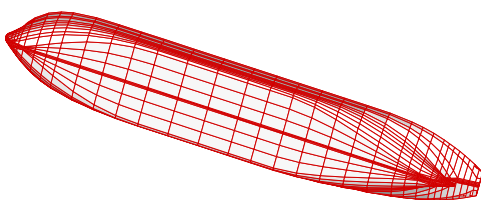


Fig. 13 Panel model of KSUPRAMAX-O (AdFLOW)

전산유체역학 기법이란, 선체 주변의 유동 영역에 유한체적법 (Finite Volume Method)을 적용하여 격자를 생성하고, 생성된 격자들 사이에 정해진 지배방정식들을 적용하여 유동장 및 압력장을 계산하는 수치해법이다. 본 해석에는 비정상, 비압축성 유동을 가정하여 아래와 같이 3개의 보존 방정식이 적용되었다.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho g - \nabla p + (\mu + \mu_t) \nabla^2 \vec{V} \tag{2}$$

$$\frac{D\alpha}{Dt} + \nabla \cdot [C_\alpha (u_{water} - u_{Air}) \alpha (1 - \alpha)] = 0 \tag{3}$$

식 (1)과 식 (2)는 각각 질량 보존과 운동량 보존을 계산하기 위해 사용되었으며, 공기와 물 사이의 경계면 추적을 위한 VOF(Volume of Fluid) 기법 적용을 위해 식 (3)이 사용되었다. 위 식에서 \vec{V} 는 각 격자점에서의 속도 벡터를, ρ 는 밀도, t 는 시간, p 는 압력, α 는 각 격자점에서의 물의 체적 비율, C_α 는 수선면 압축 계수를 나타낸다. μ 는 유체 점성을, μ_t 는 난류 점성을 나타낸다. 본 해석에서는 RANS Standard K-Epsilon Row-Re 난류 모델을 사용하였으며 평균 Y+ 값은 14의 값을 가진다. 해석 영역은 선체 앞뒤로 2파장, 공기 영역 1 Lpp, 물 영역 1.5 Lpp의 크기로 설정하였으며, 선박의 middle Line을 기준으로 절반의 영역만 해석을 진행하였다. 격자는 trimmer 및 prism layer 기법을 사용하였으며, 파 정밀도를 높이기 위해 수선면 근처 파고의 2배 수준의 영역에 파장당 100개 이상, 파고당 9개의 격자를 적용하였다. 추가적으로, 선수부 및 선박의 조파 영역에 추가로 격자를 생성하여 총

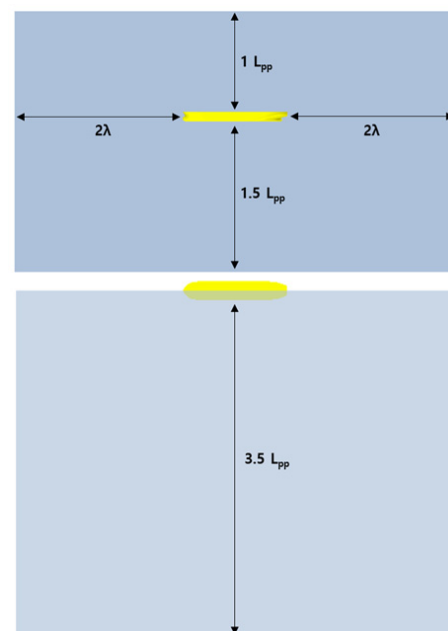


Fig. 14 Simulation Domain of CFD (STAR-CCM+)

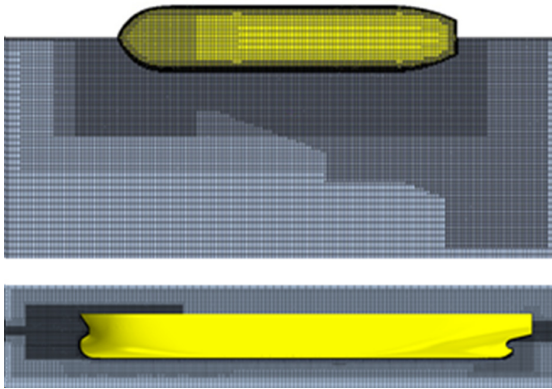


Fig. 15 Simulation Mesh of KSUPRAMAX-O (STAR-CCM+)

500만개 전후 수준의 격자를 사용하였다. 해석에는 상용 코드인 StarCCM+ V15.04가 사용되었다.

StarCCM+에서 제공하는 2차 시간 차분 기법을 사용하였으며 공간 차분 기법으로는 2차 Upwind 기법이 사용되었다. 해석 시간차는 조우 주기를 기준으로 1/800 수준으로 설정하였으며, 총 해석 시간은 조우 주기를 기준으로 30주기로 설정하였다. 운동응답 및 부가저항의 계산은 마지막 10주기 해석 결과를 사용하였다. 해석 영역의 입구, 하부 및 상부 경계 조건으로 일정 속도 조건을 부여하였으며, 출구에는 일정 압력 조건을 부여하였다. 경계에서의 속도 및 압력 값은 입사파 Field Function 값을 적용하였다. 선체 부분에는 벽 조건이 사용되었으며, 그 외의 경계에는 대칭 조건을 적용하였다. 선박의 운동응답 해석을 위해 DFBI(Dynamic Fluid Body Interaction) 기법을 사용하였으며, 파랑 중 선박의 운동응답 중 주요 변화 값인 전후동요(surge), 상하동요(heave), 종동요(pitch), 3 자유도 운동 해석을 진행하였다. 실험에 사용된 스프링과 동일한 형태의 스프링을 선수 및 선미에 적용하였으며, 스프링 상수는 198.78 N/m 값을 사용하였다.

5. 모형시험 결과

5.1 운동응답

상대파고 분석에 앞서 운동응답을 살펴보았다. 모형시험을 선수파 조건에서 수행하였기 때문에 운동응답은 상하동요(heave)과 종동요(pitch)를 비교하였으며 운동응답의 크기와 위상을 비교하였다. Fig. 16과 Fig. 17은 저속 조건에서 운동응답을 나타낸 것이다. 점으로 나타낸 것이 모형시험의 결과이며 청색 실선으로 나타낸 것이 포텐셜 해석(AdFLOW)의 해석결과이다. 그리고 시안색 실선으로 나타낸 것이 전산유체역학(STAR-CCM+)의 결과이다. 상하동요 응답은 전체적으로 모형시험의 응답 크기와 위상이 두 수치해석의 결과와 모두 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 종동요 응답의 크기와 위상 모두 수치해석의 결과와 모형시험의 결과가 잘 일치하였다.

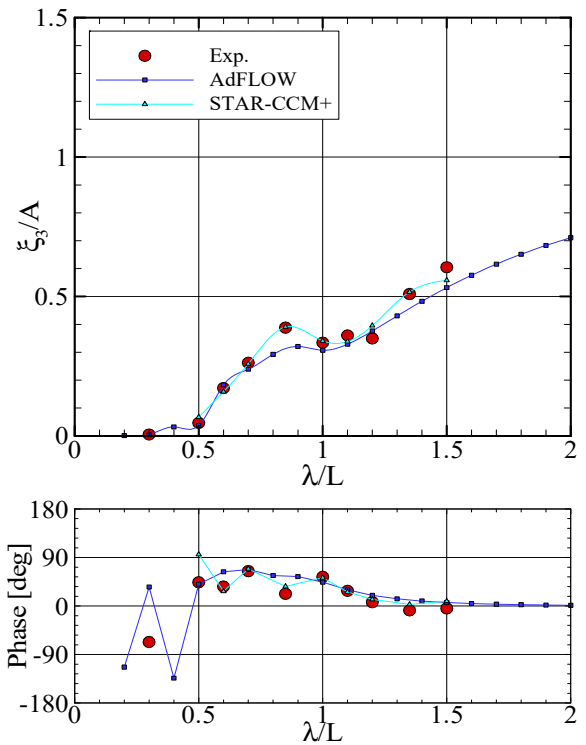


Fig. 16 Heave motion responses (Fr = 0.047)

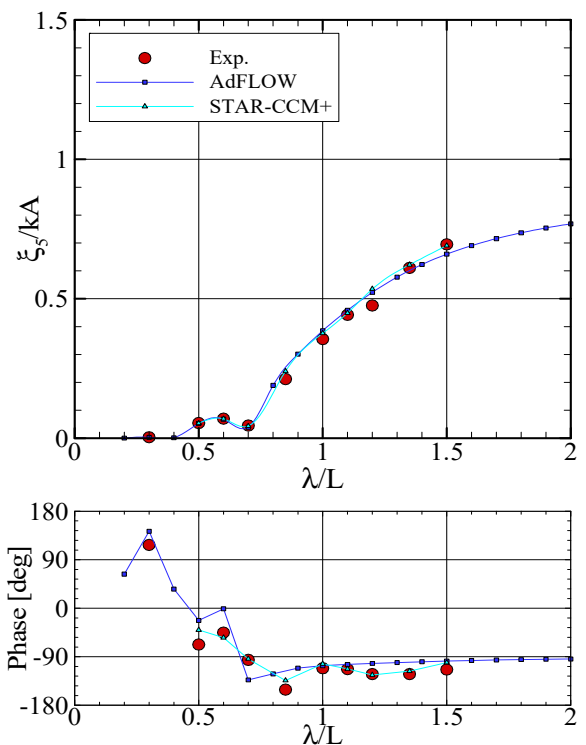


Fig. 17 Pitch motion responses (Fr = 0.047)

Fig. 18과 Fig. 19는 설계 속도에서 운동응답을 나타낸 것이다. 상하동요와 종동요 응답의 크기를 보면 모형시험의 결과와 수치해석의 결과가 전반적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 포텐셜 해석 결과 중, 상하동요와 종동요의 위상은 $0.7 \leq \lambda/L \leq$

1.0 부분에서 모형시험 결과와 조금 차이를 보인다. 이는 포텐셜 해석에서 속도의 영향을 정확하게 반영하지 못하기 때문인 것으로 추정된다.

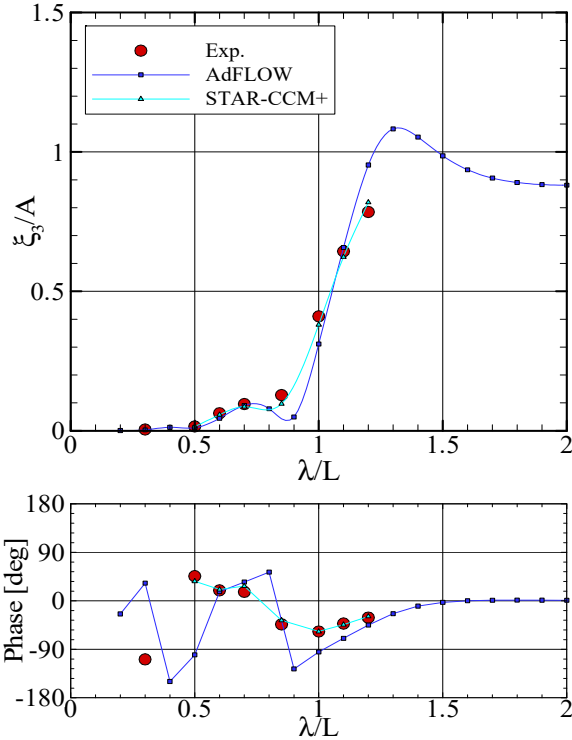


Fig. 18 Heave motion responses ($Fr = 0.172$)

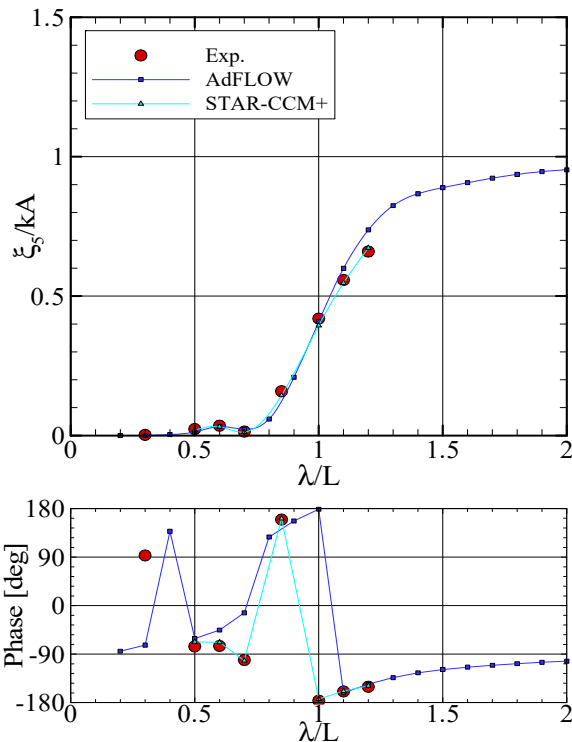


Fig. 19 Pitch motion responses ($Fr = 0.172$)

저속 조건과 설계 속도에서 포텐셜 해석과 전산유체역학 해석의 전역거동에 해당하는 상하동요 및 종동요는 모형시험의 결과와 수치해석의 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

5.2 상대파고 계측

상대파고가 잘 계측되는지 확인하기 위해서 카메라로 촬영한 영상과 계측된 상대파고를 비교하였다. Fig. 20은 카메라로 촬영한 영상에서 선수 측면에 상대파고가 가장 높을 때와 가장 낮을 때를 보여준다. 영상으로부터 상대파고를 정확하게 계측할 수는 없지만 선체 표면에 표기된 선들로부터 상대파고를 대략적으로 추정할 수 있다. RW2에서 상대파고는 6 m ~ 15 m 사이를 진동하는 것으로 보이며 RW3에서 상대파고는 6.2 m ~ 13.8 m 사이를 진동하는 것으로 보인다. Fig. 21은 상대파고 계측 시계열을 나타낸 것이다. 영상으로부터 추정한 값과 실제 상대파고에서 계측한 값이 유사한 것을 확인할 수 있다. 이로부터 본 연구에서 선택한 저항식 파고계, 파고계를 선체에 설치하는 방법, 파고계를 교정하는 방법이 잘 작동하는 것을 확인할 수 있다.

5.3 상대파고 결과 비교

계측된 상대파고는 정상(steady) 상태 값과 비정상(unsteady) 상태 값으로 구성되어 있다. 정상 상태의 값은 전진 속도에 의해서 발생하는 것이다. Fig. 22은 정상 상태의 상대파고를 나타낸 것이다. 모형시험 결과는 붉은색 점으로 나타내었고 전산유체역학의 결과는 청색 점으로 나타내었다. 본 연

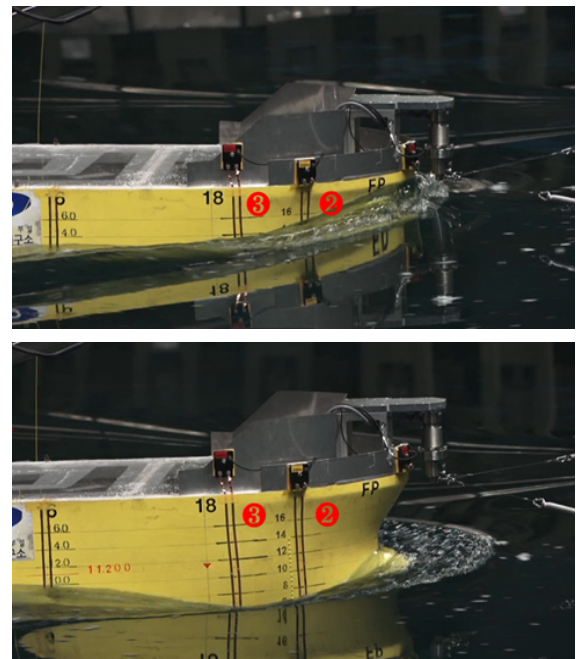


Fig. 20 Snapshots of relative wave elevation

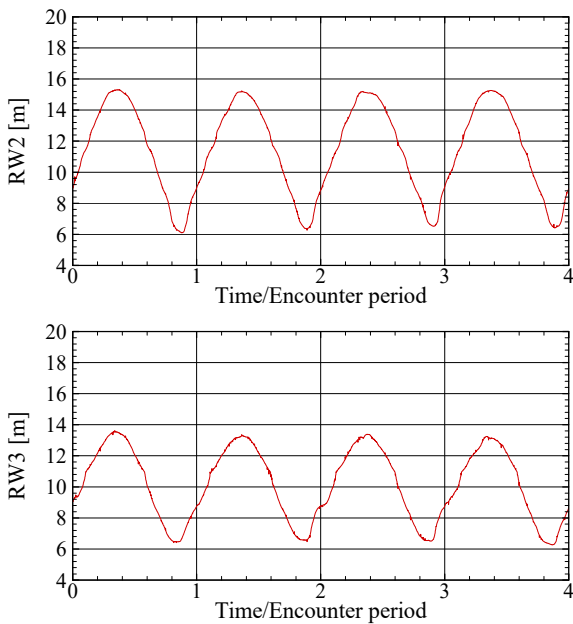
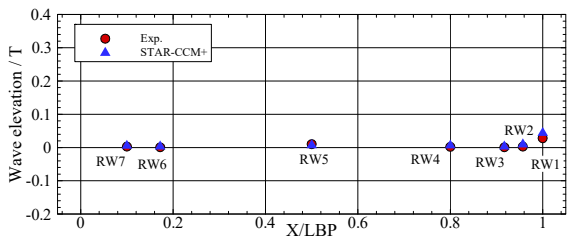
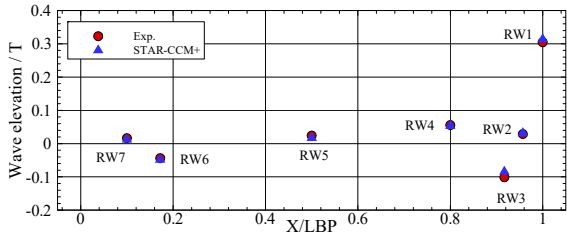


Fig. 21 Time histories of relative wave elevation



(a) $Fr = 0.047$



(b) $Fr = 0.172$

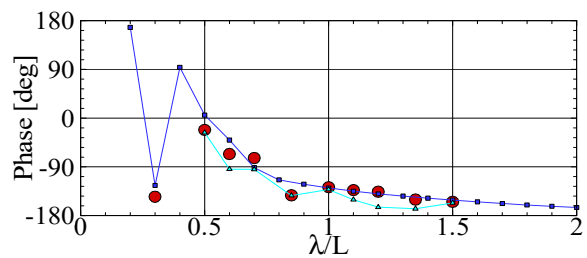
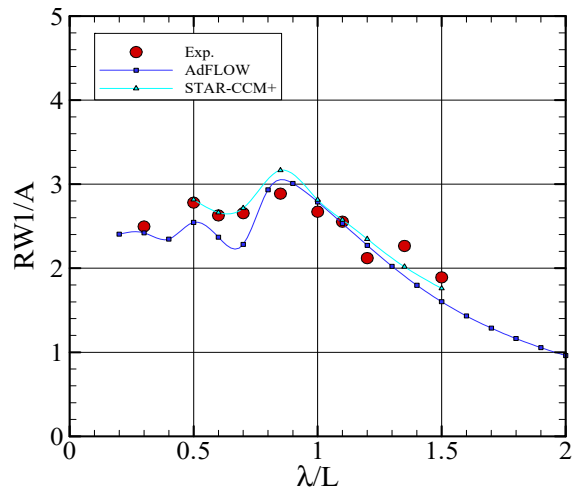
Fig. 22 Steady wave elevation

구에서 사용한 포텐셜 해석에서는 정상 상태의 값이 해석되지 않기 때문에 아래 그래프에 나타내지 않았다. 낮은 속도 ($Fr=0.047$)와 설계 속도($Fr=0.172$)에서 전산유체역학의 결과와 모형시험의 결과는 큰 차이 없이 유사한 값을 보여주었다.

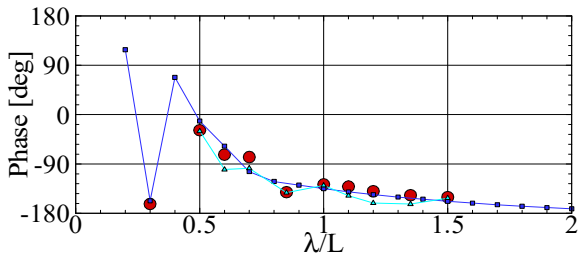
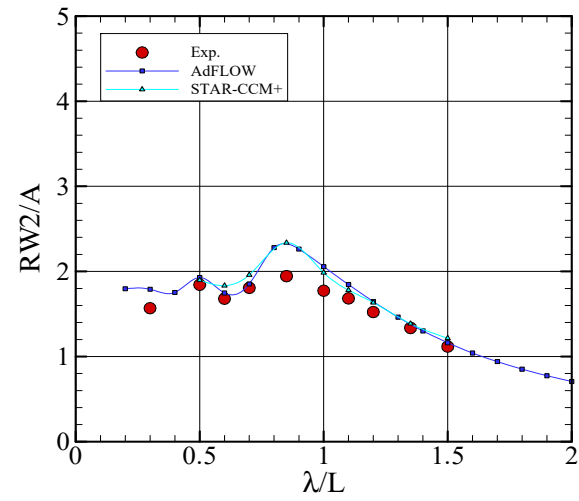
비정상 상태의 상대파고는 크기와 위상으로 구분하여 모형 시험 결과와 비교하였다. Fig. 23은 낮은 속도($Fr=0.047$) 조건에서 7개의 지점의 상대파고 크기와 위상을 나타낸 것이다. 점으로 나타낸 것이 모형시험의 결과이며 청색 실선으로 나타낸 것이 포텐셜 해석(AdFLOW)의 해석결과이다. 그리고 시안색 실선으로 나타낸 것이 전산유체역학(STAR-CCM+)의 결과이다. RW1에서 모형시험의 결과와 포텐셜, 전산유체역학의 결과는 전반적으로 유사하였다. 상대파고의 가장 큰 지점은 파장이

선박의 길이보다 조금 짧은 파장에서 발생하였다. 위상은 선박의 무게중심을 기준으로 해석되었기 때문에 장파장 영역에서 -180° 에 접근하는 경향을 보여주었다. RW2에서 수치해석의 위상은 모형시험과 유사하지만 상대파고의 크기는 파장이 모형선의 길이와 유사한 영역에서 모형시험과 비교해서 조금 더 큰 값을 보여주었다. RW3에서도 RW2에서 보여주었던 경향과 유사한 경향을 보여주었다. RW4에서는 모형시험 결과와 비교해서 포텐셜 해석의 결과는 전반적으로 큰 값을 보여주었다. 전산유체역학의 결과는 포텐셜 해석 결과와 비교해서 모형시험의 결과와 좀 더 유사한 값을 보여주었다. RW5는 선체 중앙에 위치하기 때문에 단파장 영역에서는 크기는 입사파와 유사한 응답을 보여주었고 위상은 0에 근접하였다. 그리고 장파장으로 가면서 상대파고의 진폭은 줄어들었다. RW6과 RW7은 선미 부분에 위치하기 때문에 상대파고의 크기는 선수 부분과 비교해서 작은 값을 보여주었다. 전반적인 경향은 모형시험 결과와 두 수치해석의 결과들이 비교적 잘 일치하였다.

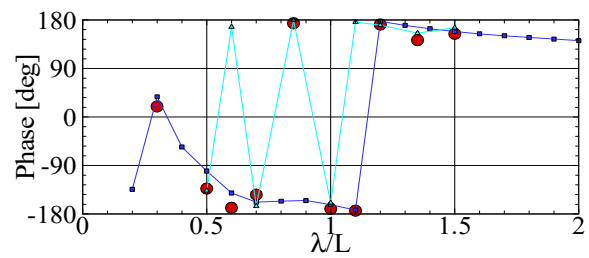
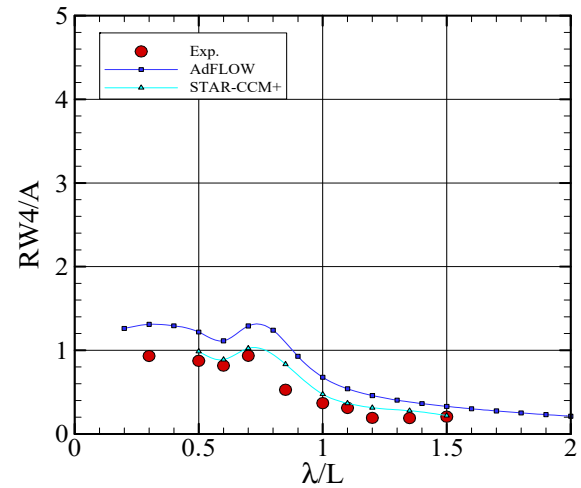
Fig. 24는 설계 속도($Fr=0.142$) 조건에서 7개의 지점의 상대파고 크기와 위상을 나타낸 것이다. RW1에서 상대파고의 크기는 낮은 속도와 비교해서 증가하였으며 가장 큰 상대파고가 나타나는 위치는 장파장 영역으로 이동하였다. 수치해석의 결과는 서로 유사하였으나 상대파고의 크기가 모형시험 결과보다 큰 값을 보여주었다. 상대파고의 위상은 모형시험과 수치해석의 결과가 비교적 잘 일치하였다. RW2에서 모형시험과 전산유체역학의 해석 결과는 비교적 잘 일치하였으나 포텐셜 해석 결



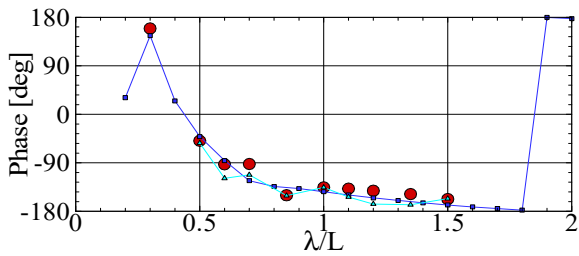
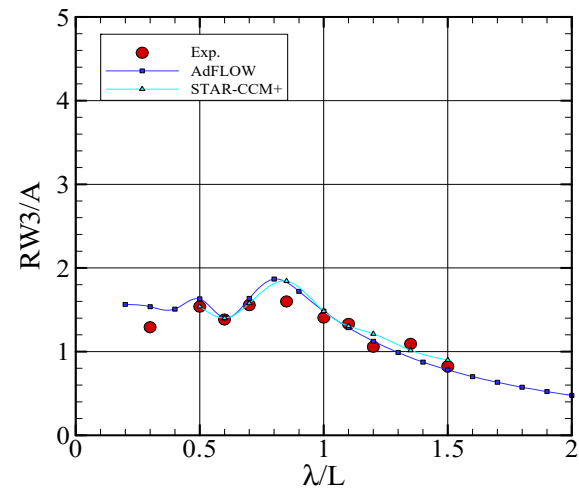
(a) RW1



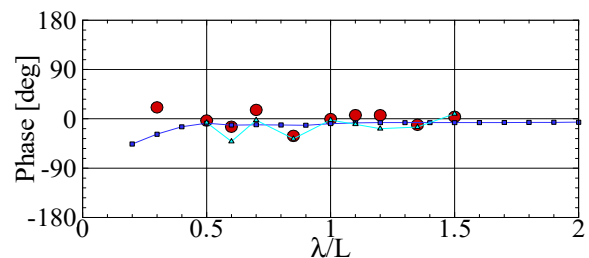
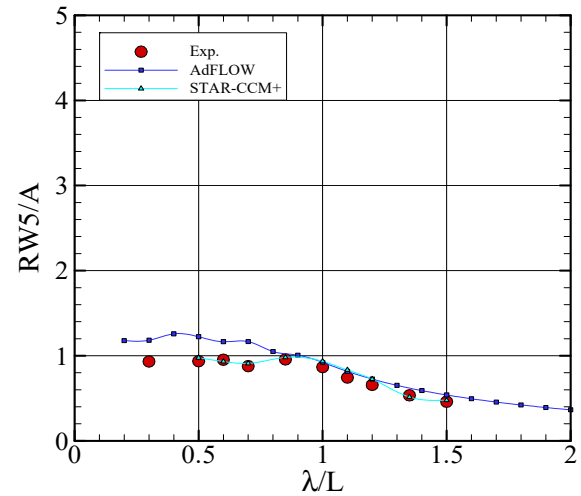
(b) RW2



(d) RW4



(c) RW3



(e) RW5

과는 모형시험 결과와 비교해서 전반적으로 작은 값을 보여주고 가장 큰 상대파고 나타나는 지점이 모형시험보다 장파장에서 나타났다. RW3에서도 RW2에서 나타났던 경향과 유사한 경향을 보여주었다. RW4에서는 포텐셜 해석의 결과가 모형

시험과 전산유체역학의 해석 결과와 경향은 유사하나 큰 값을 보여주었다. RW5의 결과를 보면 모형시험의 결과와 전산유체역학의 결과는 잘 일치한 반면, 포텐셜 해석의 결과가 모형시험과 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. RW5는 낮은

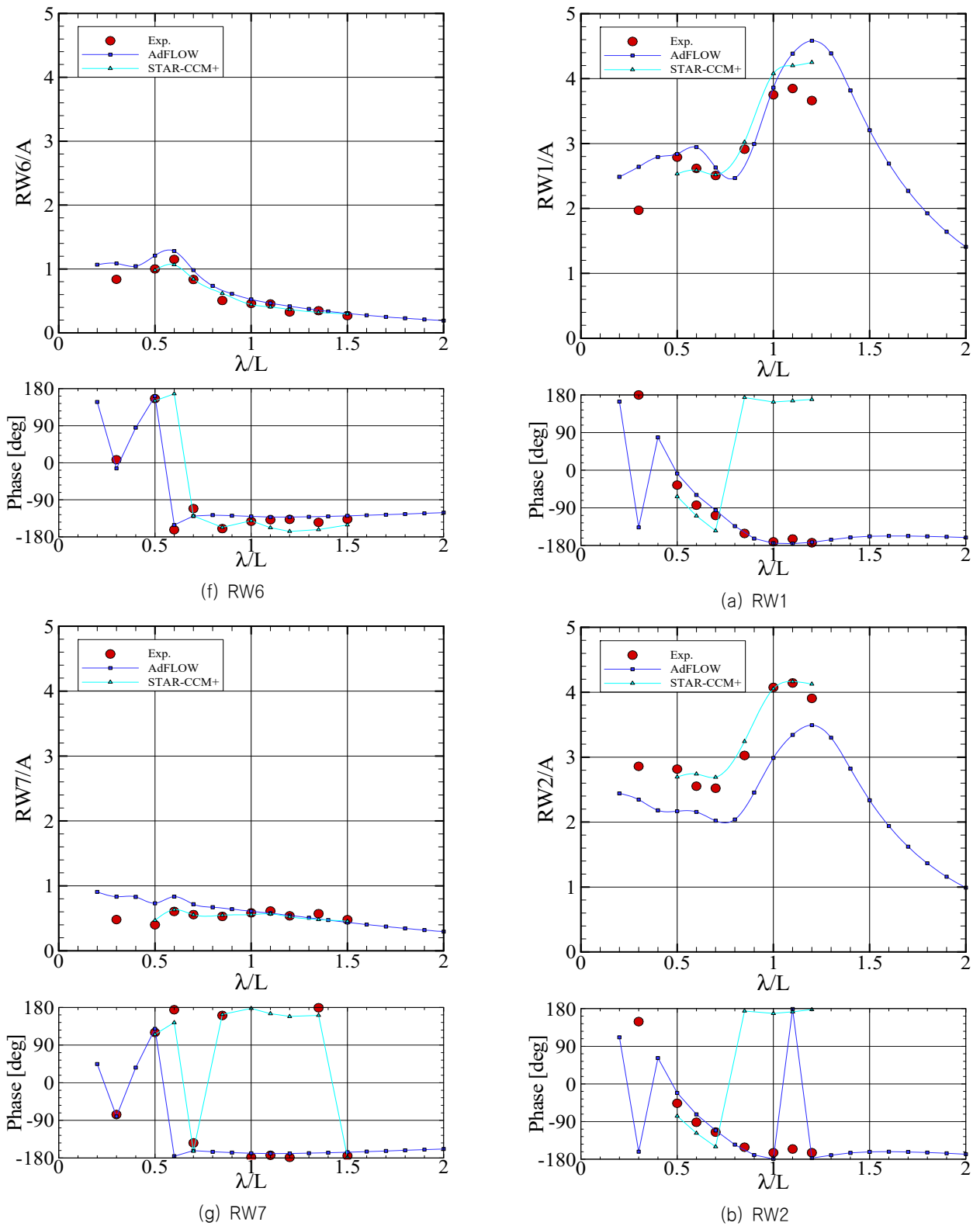
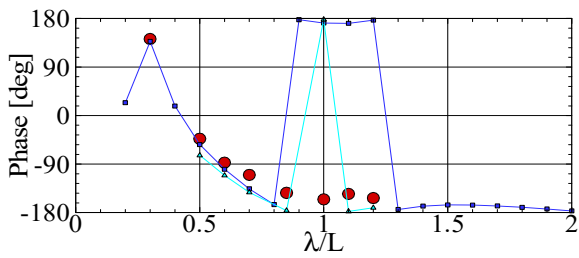
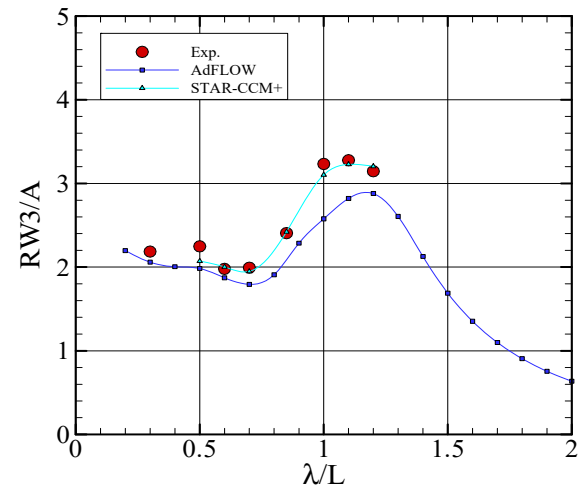


Fig. 23 Relative wave elevation (Fr = 0.047)

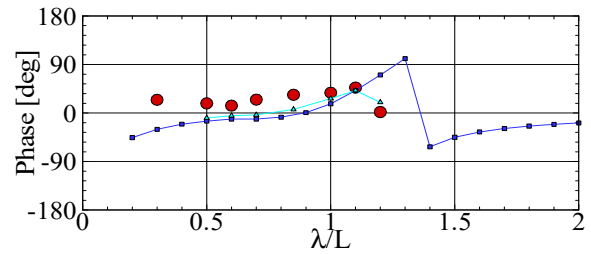
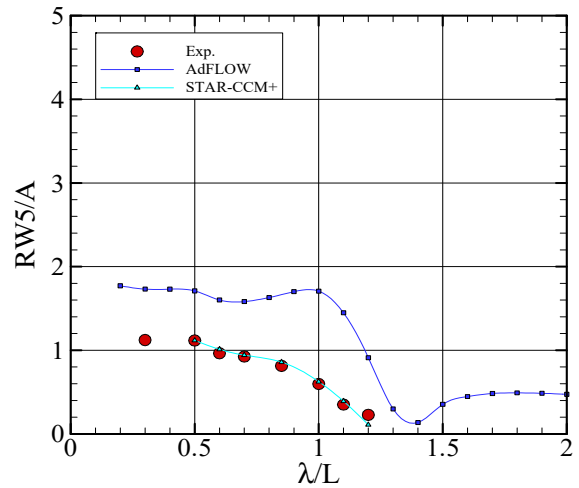
속도에서 위상이 0에 접근하였으나 설계 속도에서는 위상이 0으로 접근하지 않았다. 선미 부분에 해당하는 RW6, RW7에서 모형시험 결과와 전산유체역학의 결과는 잘 일치하였으나 포텐셜 해석의 결과는 차이가 많이 발생하였다. RW6, RW7에서 상

대파고의 크기가 감소하는 부분이 발생하는데 포텐셜 해석의 결과는 상대파고의 크기가 감소하는 파장이 장파장 영역으로 이동해 있다.

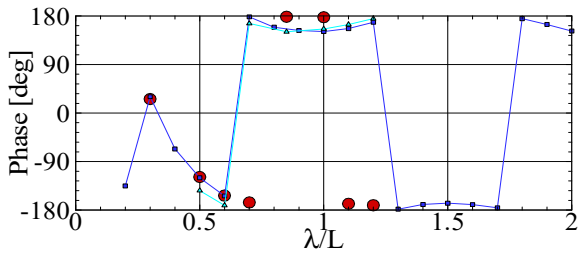
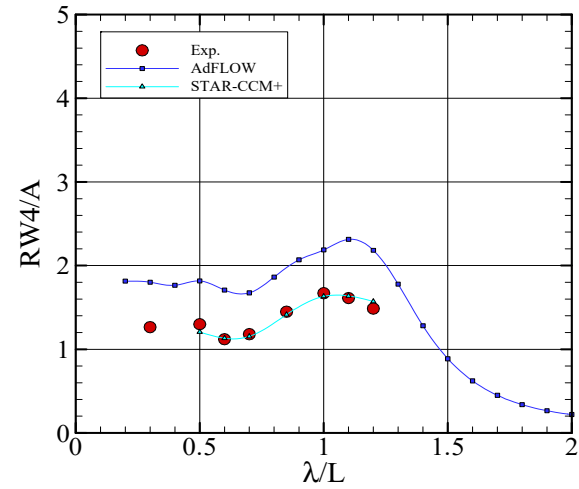
이러한 포텐셜 해석의 결과가 모형시험과 전산유체역학의 결과와 차이를 보이는 이유는 본 연구에서 이용한 포텐셜 해석



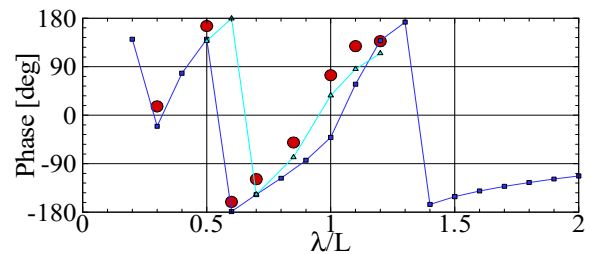
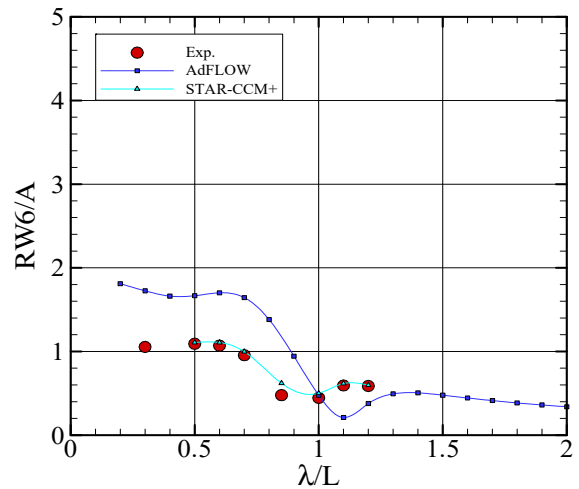
(c) RW3



(e) RW5



(d) RW4



(f) RW6

방법이 속도효과를 엄밀하게 반영하지 못하기 때문인 것으로 보인다. 본 연구에서 적용한 포텐셜 해석 방법은 전역거동은 비교적 잘 예측하지만 선미 부분 파랑장을 예측하는 것에는 한계가 있는 것으로 보인다. 이러한 결과는 부가저항을 해석하는데도 영향을 미칠 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 KSUPRAMAX-O 선박의 상대파고를 모형시험을 통해서 예측하고, 예측된 상대파고와 수치해석 결과를 비

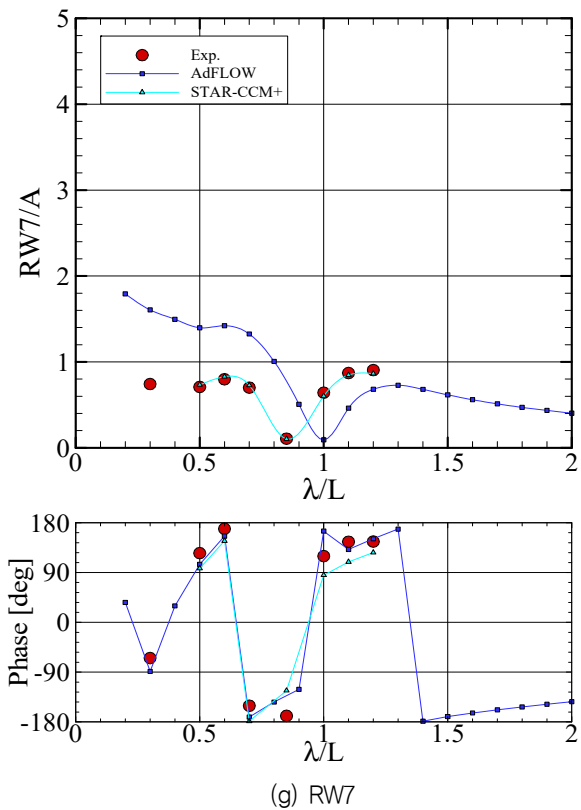


Fig. 24 Relative wave elevation (Fr = 0.142)

교하였다. 먼저 모형시험에서 상대파고를 계측하기 위해 파고계의 특성을 파악하기 위한 시험을 수행하였다. 이를 바탕으로 해양공학수조에서 운동응답 및 상대파고 계측 시험을 수행하였다. 또한 두 가지 수치해석 방법(포텐셜 & 전산유체역학)을 적용하여 수치해석을 수행하고 모형시험 결과와 비교하였다. 이러한 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 상대파고를 계측하기 위한 파고계 결정을 위해서 저항식, 용량식, 초음파식 파고계의 비교 시험을 수행하고 상대파고 계측에 저항식 파고계가 적합한 것을 확인하였다. 또한 파고계를 설치하는 방법, 파고계의 비선형 교정에 대해서 검토를 수행하여 상대파고 계측에 적합한 파고계 설치 방법과 교정법을 확인하였다.
- 선수 규칙파 조건에서 내향성능 시험을 수행하고 운동응답의 크기 및 위상을 얻었다. 운동응답은 모형시험의 결과와 수치해석의 결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다.
- 선체 표면 7개의 지점에서 상대파고를 계측하였으며 모형시험 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 낮은 속도 (Fr=0.047)조건에서 모형시험의 결과와 수치해석의 결과는 전반적으로 잘 일치하였다. 그러나 설계 속도(Fr=0.142)조건에서 모형시험의 결과와 전산유체역학의 결과는 유사한 경향을 보여 주었으나 포텐셜 해석 결과는 모형시험과 차이를 보여주었다. 포텐셜 해석 결과가 모형시험 결과와 차이를 보이는 이유는 선

박의 전진 속도를 엄밀하게 반영하지 못하기 때문인 것으로 보인다.

후 기

본 논문은 해양수산부 재원으로 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “극한환경상태의 선박성능 평가기술 개발”에 의해 수행되었습니다(1525014865, PES4732).

References

Gui, L., Longo, J., Metcalf, B., Shao, J. and Stern, F. 2001. Forces, moment, and wave pattern for surface combatant in regular head waves Part I. Measurement systems and uncertainty assessment. *Experiments in fluids*, 31(6), pp.674–680.

Gui, L., Longo, J., Metcalf, B., Shao, J. and Stern, F. 2002. Forces, moment and wave pattern for surface combatant in regular head waves Part II. Measurement results and discussions. *Experiments in Fluids*, 32(1), pp.27–36.

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

Kim, B.N., Kim, W.J., Kim, K.S. and Park, I.R. 2009. The comparison of flow simulation results around a K LNG model ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(3), pp.219–231.

Kim, K.H. and 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, M., Kim, M., Seo, J. and Seok, W. 2023. Review of newman-sharma wave pattern resistance analysis using experimental and computational model tests of KCS. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 60(2), pp.76–85.

Kim, W.J., Van, S.H. and Kim, D.H. 2001. Measurement of flows around modern commercial ship models. *Experiments in Fluids*, 31(5), pp.567–578.

Kim, T., Yoo, S., Oh, S., Kim, H.J., Lee, D. and Kim, B. 2017. Numerical and experimental study on the estimation of added resistance of an LNG carrier in Waves. *27th International Ocean and Polar Engineering*, San Francisco, USA, 25–30 June 2017.

Lee, J. *Towing test and wave pattern analysis for prediction of added resistance on ships in waves*, Ph.D. thesis,

Seoul National University.

- Maury, C., Delhommeau, G., Boin, J. P. and Guilbaud, M. 2003. Comparison between numerical computations and experiments for seakeeping on ship models with forward speed. *Journal of ship research*, 47(4), pp.347-364.
- Olivieri, A., Pistani, F., Wilson, R., Campana, E. F. and Stern, F. 2007. Scars and vortices induced by ship bow and shoulder wave breaking. *Journal of Fluids Engineering*, 129(11), pp.1445-1459.
- Van, S.H., Yonn, H.S., Lee, Y.Y., Park, I.R., Lee, C.J. and Kim, W.J. 2003. Measurement of flow around KRISO 138K LNG Carrier Model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(2), pp.1-10.

