



# 선박의 부가저항 평가를 위한 소프트 계류 모형시험 기법 연구

서민국, 박인보, 박동민<sup>†</sup>, 황승현  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

## A Study on Soft-Mooring Model Test Techniques for the Evaluation of Added Resistance on Ships

Min-Guk Seo, In Bo Park, Dong-Min Park<sup>†</sup>, Seunghyun Hwang  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, a model test was conducted using the soft-mooring technique to evaluate the added resistance of the ship in waves. The study also examined the specific factors that should be considered during the soft-mooring test. The main purpose of soft-mooring is to prevent drifting caused by waves by providing horizontal restoring forces. However, it can also create undesired restoring forces in the vertical direction. Therefore, we examined the restoring force of the ship's 6-DOF motion based on the arrangement of the soft-mooring and the height of the mooring connection point. We also checked the corresponding resonance period and drift distance. The soft-mooring test was conducted twice, once with self-propulsion and once without self-propulsion, allowing us to review the advantages and disadvantages of each test technique. The main parameters measured in these model tests were 6DOF motion and added resistance on the ship. We compared these measurements obtained from two different techniques (with and without self-propulsion). Additionally, we also compared the measurements based on the types of measuring sensors used (2D load cells on FP, AP, and 1D load cells on each mooring line) as well as the height of the mooring connection point.

**Keywords** : Added resistance(부가저항), Model test(모형시험), KVLC2, Soft-mooring test(소프트 계류 시험), Self-propulsion (자체 추진)

## 1. 서론

해상에서 운항하는 선박은 다양한 환경하중을 받게 되어 에너지 손실과 운항 효율 저하를 경험하게 된다. 이 중에서 파랑 중 부가저항은 선박 운항 효율 저하에 큰 영향을 미치는 요인 중 하나이며, 이는 파도와 선박의 상호작용으로 인해 발생한다. 파랑 중 부가저항은 선박의 속도, 파도의 주기, 크기, 방향 등에 영향을 받으며, 이에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 특히, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 2013년에 선박의 이산화탄소 배출량을 제한하기 위해 에너지효율 설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 처음으로 도입했으며, 이후 여러 차례의 개정을 통해 EEDI 규정이 점차 강화되고 있다. 이전에는 주로 상업용 선박에 대해서만 규정이 적용되었지

만 최근에는 여객선, 어선 등 다른 선박 유형에도 규정이 적용되고 있으며, 에너지 감축 목표도 강화되고 있다. 이러한 사회적 배경으로 인해 파랑 중 부가저항에 대한 연구 또한 활발하게 이루어지고 있으며, 다양한 방법을 사용하여 파랑 중 부가저항을 평가고 개선하는 연구들이 많이 진행되고 있다.

선박의 파랑 중 부가저항을 평가하기 위해서 수치해석 및 모형시험 방법이 주로 활용되며, 최근에는 다양한 모형시험 및 수치해석 결과를 적용한 경험식이 제안(Liu and Papanikolaou, 2020, 2023; IMO, 2021)이 되기도 하였다. 수치해석 방법의 경우 포텐셜 기반 해석 및 CFD 해석이 사용되며, 계산 비용이 모형시험에 비해서 비교적 저렴하고, 다양한 조건에서의 부가저항을 예측할 수 있다(Seo et al., 2013; Kim et al., 2019).

모형시험 방법은 축척된 모형 선박을 사용하여 예인수조 혹은

해양공학수조에서 시험적 방법으로 부가저항을 추정한다. 모형시험 시설에서 파도를 생성하고 모형선을 예인하면서 부가저항을 계측하기 때문에 비교적 정확한 부가저항 추정이 가능하며, 시설에 따라서 다양한 파도 조건에서의 시험이 가능하다. 다만, 모형시험은 비용이 비싸다는 단점이 있다. 모형시험을 통하여 선박 부가저항을 추정할 수 있는 방법은 선박이 예인 되는 방법에 따라서 크게 세 가지로 분류할 수 있다 (ITTC 2021).

- 구속 모형 시험, Captive test
- 소프트 계류 시험, Soft-mooring test
- 자유 항주 시험, Free-sailing test

구속 모형 시험의 경우 예인전차가 선박의 전후 동요 운동 (surge motion)을 구속하고 끌고 가는 시험이며, 구현하기 쉽고 일정한 속도에서 선박의 종방향 힘을 직접 측정할 수 있으며, 정수 중 저항을 구하기 쉽다는 장점이 있다. 반면 파도 중에서 시험하는 경우 파도에 의한 기진력을 계측센서가 감당해야 하기 때문에 높은 부하를 감당할 수 있는 센서를 적용해야 하며, 따라서 평균값인 부가저항을 추정하기에는 정확도가 떨어질 수 있다. 구속 모형시험 연구로는 Lu et al. (2016)은 파라메트릭 횡동요가 부가저항에 미치는 영향을 확인하기 위해서 구속 모형시험 방법을 적용한 바 있다. Lee et al. (2017)은 선박의 선수부형상에 따른 부가저항 효과를 살펴보기 위해서 예인수조에서 모형시험을 수행하였으며, 전후동요 운동이 구속된 경우(captive test)와 소프트 스프링을 적용하여 구속하지 않은 경우(soft-mooring test)를 모두 시험하여 결과를 비교하였다. Shivachev et al. (2020)은 트림 각도에 따른 부가저항을 추정하기 위해서 예인수조에서 전후 동요 운동이 고정된 형태의 모형시험을 수행한바 있다.

소프트 계류 시험은 스프링 시스템을 사용하여 전후 동요 운동 (surge motion)을 구속하지 않는 시험이며, 따라서 계측 센서가 선박 종방향의 파랑 기진력을 감당하지 않아도 되며, 낮은 부하의 정도 높은 센서를 사용할 수 있기 때문에 부가저항 계측의 정확도가 높아 질 수 있다. 반면 소프트 계류 시험은 선박의 복원력이 없는 수평면 방향의 운동(surge, sway, yaw)에 스프링 시스템을 사용하여 가상의 복원력을 주는 형태이기 때문에 수평면 방향의 운동 주기가 운동 및 부가저항에 영향을 주지 않도록 적당한 설계가 필요하다. 소프트 계류 시험은 시험기법이 비교적 단순하지만 계측 정확도가 높기 때문에 다양한 시험기관에서 자주 사용되는 방법이며 관련된 연구도 다수 존재한다. Park et al. (2016)은 KVLCC2 선형의 흘수별 부가저항을 추정하기 위해서 예인수조 모형시험을 수행하였다. 소프트 스프링을 활용하여 전후 동요 운동을 가능하게 하였으며, 수직방향 운동을 포함한 4자유도 운동(surge, heave, roll, pitch)이 가능한 상태에서 선수파 조건에서의 흘수별 운동 및 부가저항을 추정하였다. Seo et al. (2021), Kim et al. (2021)은 다양한 파향 조건에서 각각 KVLCC2 및 액화천연가스운반선의 부가저항을 추정하기 위해서 KRISO 해양공학수조에서 소프트 계류 방식으로 모형시험을 수행

하였으며, 수치해석 기법과의 결과 비교를 통해서 수치해석 기법의 정확도를 검토하였다. Saettone et al. (2021)은 자체추진이 포함된 소프트 계류 시험을 수행하였으며, 선수 선미피에서의 운동뿐만 아니라 추진성능을 평가하였다.

자유 항주 시험은 선박을 구속하는 시스템이 전혀 없이 자체 추진(self-propulsion)기능이 포함된 형태로 모형시험을 수행한다. 파도 중에서의 부가저항을 추정하기 위해서 증가되는 프로펠러의 추력을 계측한 후 추력 감쇠 계수(thrust deduction factor,  $t$ )를 적용하여 계산한다.

$$R_{AW} = (T_{wave} - T_{calm})(1 - t) \quad (1)$$

자유 항주 시험은 선박을 구속하는 시스템이 없기 때문에 모든 파향에 대해서 실제 선박과 동일한 운동을 모사할 수 있으며, 파도 중에서의 추진 효율 검토도 가능하다. 하지만 파도 중에서 선박의 특정 속도를 만들어 내기 위해서 여러 번의 반복 시험이 필요하며, 정확한 추력감소 계수의 도출 (대부분의 경우 정수 중 값을 그대로 적용) 또한 어렵다. 그리고 자체 추력 기능이 포함되어야 하기 때문에 모형시험 비용이 비싸며, 시험 결과의 해석도 어려운 편이다. Park et al. (2019)은 탱커선형을 사용하여 해양공학수조에서 다양한 파향에서 자유 항주 모형시험을 수행하였으며, 선수파 조건의 예인수조시험 결과 및 포텐셜 기반의 수치해석 결과와 비교한 바 있다. Kjellberg and Gerhardt (2019)는 일반적인 자유 항주 시험에서 발생하는 모형선박의 가속도로 인한 추력 변화 부분 보정하는 방법을 제안하였다. Zheng et al. (2021)은 액화천연가스운반선 내부의 슬로싱으로 인한 부가저항 변화를 살펴보기 위해서 예인수조에서 자유 항주 시험을 수행하였다. Lee et al. (2021)은 4개의 선종을 사용한 부가저항 추정 벤치마크 연구의 결과를 보여주고 있으며, 해양공학수조에서의 자유 항주 시험뿐만 아니라 예인수조에서의 시험, 포텐셜 및 CFD 기반 수치해석 결과를 정리하였다.

본 연구에서는 선박의 파랑 중 부가저항을 추정하기 위해서 소프트 계류 모형시험 연구를 진행하였으며, 모형시험은 선박해양플랜트연구소 심해공학수조(부산)에서 수행하였다. 대상선형은 선박해양플랜트연구소 공시선형인 KVLCC2이며, 1/58 스케일의 모형을 제작하여 모형시험을 진행하였다. 모형시험에 앞서 소프트 계류의 배치, 연결점 높이에 따른 6자유도 방향으로 추가되는 복원력의 크기를 살펴보았으며, 소프트 계류 배치 시 주의해야 될 사항에 대해서 고찰하였다. 또한 모형시험에 사용된 최종적인 배치에서의 수평면 방향 주기 및 표류거리를 계산하여 스프링에 의한 영향이 적절한지에 대해서 검토하였다. 소프트 계류를 활용한 모형시험은 자체 추진 기능이 포함된 경우와 포함되지 않은 경우에 대해서 각각 시험을 수행하였으며, 각 기법의 장단점을 확인하고 결과에 대해서 비교 검토하였다. 또한 부가저항 추정에서 사용된 센서별 결과를 비교하였으며, 계류라인 연결점 높이에 따른 운동 및 부가저항 결과를 검토하였다. 이러한 과정을 통해서 소프트 계류를 통한 부가저항 모형 시험 시에 결과에 영향을 끼칠 수 있는 모형시험 세팅과 관련된 부분에 대해서 확인하고 검

토하였으며, 부가저항 추정 모형시험 준비단계에서의 도움이 될 수 있는 정보를 제공하고자 한다.

## 2. 부가저항 추정 모형시험 기법

### 2.1 소프트 계류 시험 기법

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 선박의 파랑 중 부가저항 추정을 위해서 소프트 계류 시험을 적용하였으며, 자체 추진 기능이 포함된 경우와 포함되지 않은 경우에 대해서 각각 모형시험을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 소프트 계류 시험의 배치는 Fig. 1 과 같다. 소프트 계류는 x자 형으로 선수, 선미부에 2축 로드셀이 설치되어 있으며 각 로드셀에는 두 개의 연결선에 부착된다. 각각의 연결선 한쪽 끝단에 소프트 스프링과 1축 장력계가 직렬로 연결된다. 선박의 6자유도 운동은 광학계측시스템인 Qualisys를 활용해서 측정되며, 광학계측을 위한 타겟이 선박의 표면에 부착된다. 자체 추진이 포함된 시험의 경우 프로펠러와 러더의 구동부, 제어부, 계측부가 선박에 추가되며, 프로펠러의 추력과 토크를 계측할 수 있는 자동동력계가 설치된다.

소프트 계류 시험 기법을 적용하여 선박의 부가저항을 추정할 경우 선박 감가속 구간에서 선박을 구속해 줄 수 있는 시스템이 필요하다. 이는 가속도로 인해서 모형선이 앞뒤로 많이 밀려나게 되면 스프링에 많은 부하가 걸리게 되고, 이로 인한 스프링 소성변형이 발생하게 된다. 따라서 감가속 구간에서 모형선이 앞뒤로 많이 밀려나는 것을 방지하기 위한 구속 장치가 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 전기모터식 윈치 시스템을 적용하여 선박의 길이방향으로의 위치를 구속해 주었으며, 이를 통해서 선박의 감가속시 스프링에 과도한 힘이 가해지는 것을 방지한다.

부가저항 계측 관점에서 자체 추진의 포함 유무에 따른 차이는 다음과 같다. 자체 추진이 포함되지 않은 경우 선박의 속도에 의한 저항을 소프트 스프링이 감당해야 하며, 따라서 선박의 속도에 의한 정수 중 저항만큼 뒤로 밀린 상태에서 파도에 의한 동요가 발생한다. 반면 자체 추진이 포함된 경우에는 선박 속도에 의한 저항 성분은 추진기가 감당하며, 평균 위치는 초기 상태를 유지하게 된다. 평균 위치가 크게 밀려나는 경우 앞쪽 뒤쪽 스프링이 비대칭이 되며, sway-yaw 연성 복원력이 발생하는 등 내항

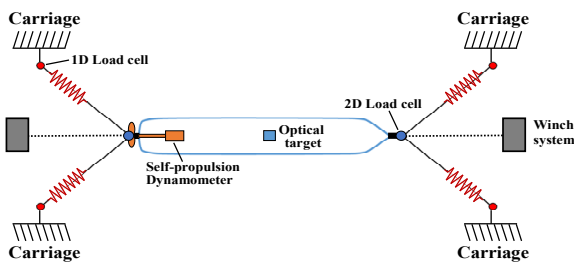


Fig. 1 Model test arrangement

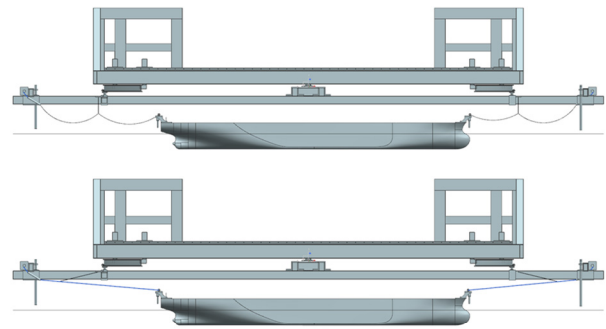


Fig. 2 Restraint system in acceleration/deceleration section upper: ship is free, lower: ship is anchored

성능 평가 관점에서 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 이는 Amaral et al. (2022)이 제안한 계류시스템의 6자유도 강성 해석 해에서도 확인할 수 있다. 이러한 점이 부가저항 추정의 정확도에 크게 영향을 미치지 않지만, 광학계측 시스템의 영역에서 벗어나거나 혹은 연결된 스프링의 소성변형을 유발할 수 있기 때문에 주의가 필요하다. 모형시험을 구성하는 측면에서는 자체추진을 포함하는 경우 프로펠러, 러더, 구동 및 제어기, 계측기 등 더 많은 시스템을 준비해야 하기 때문에 비용이 많이 들며, 선행적으로 테스트해야 할 항목 (선속별 rps 추정 등)도 늘어나며 시험 결과의 정확한 해석도 상대적으로 더 어려운 편이다. 하지만 자체 추진이 포함된다면 내항성은 뿐만 아니라 파도에 의한 추진성능의 변화 양상 또한 파악할 수 있다. 따라서 자체 추진의 유무는 시험의 비용이나 목적에 따라서 상황에 맞게 선택할 필요가 있다.

### 2.2 소프트 스프링 배치에 따른 비교

소프트 계류 시험은 소프트 스프링을 사용하여 복원력이 없는 수평면 방향의 운동(surge, sway, yaw)에 가상의 복원력을 주게 된다. 소프트 스프링을 적용할 때 서로 상충되는 몇 가지 사항을 고려해야 한다. 첫 번째는 파도에 의해서 부가저항을 포함한 파랑 표류력이 발생하며, 이 표류력으로 인해서 밀려나는 거리가 운동 계측 범위(현재는 광학 계측기 인 Qualisys 시스템 적용)를 벗어나면 안 되기 때문에, 스프링 강성이 적당히 커야 한다. 두 번째는 수평면 방향의 임의의 복원력으로 인해서 수평면 방향 운동이 일반적으로 파도의 주기보다 긴 고유주기가 생기게 된다. 이 고유 주기로 인해서 계측하고자 하는 파도 주기에서의 선박 운동 및 부가저항에 영향을 주면 안 되기 때문에 파도 주기보다 2배 이상 커야 하며, 스프링 강성이 너무 크면 안 된다. 이 두 가지 사항은 ITTC (2014)에서도 언급되는 부분이다. 세 번째는 소프트 스프링에 의해서 수평면 방향의 복원력뿐만 아니라 원치 않는 수직면 방향으로의 복원력도 발생하게 되는데 수직방향 복원력의 크기가 무시할 수 있을 만큼 작아야 한다. 따라서 본 연구에서는 스프링의 배치 그리고 연결 위치 따른 상황을 살펴보고자 한다.

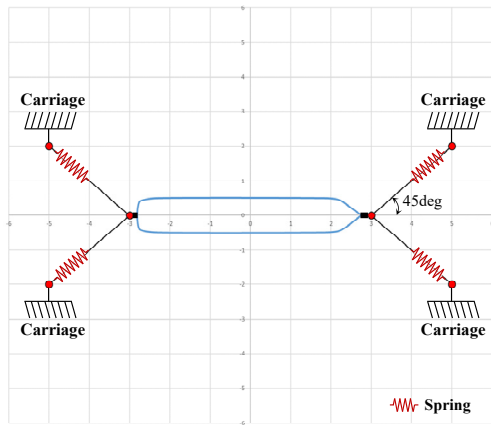


Fig. 3 X-type soft spring arrangement

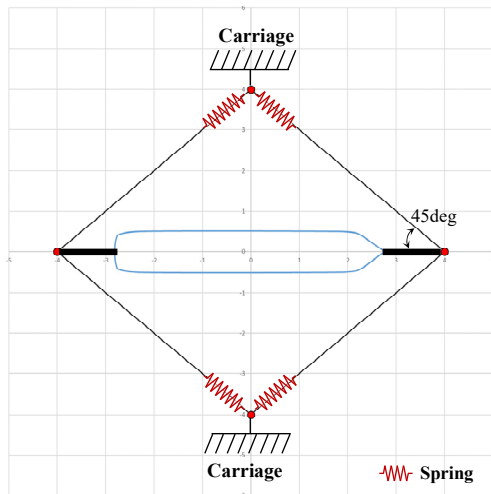


Fig. 4 Diamond-type soft spring arrangement

먼저 스프링 배치에 따른 차이를 살펴보았다. 앞서 언급한 바와 같이 현재 적용한 형태는 Fig. 3과 같은 x자 형 배치이며, 다른 연구 (Shigumov et al., 2018; Saettone et al., 2021)에서는 Fig. 4와 같은 다이아몬드 형태의 스프링 배치가 적용된바 있다. 따라서 x자형 배치와 다이아몬드형 배치의 차이를 살펴보았다. 스프링의 배치 및 연결 포인트 위치는 위의 그림과 동일하며, 사용한 스프링 강성은 196.12 N/m (20 kgf/m)이며, 초기장력은 스프링이 30cm 늘어난 상태를 가정하여 58.84 N이다. 스프링의 z 방향 높이는 무게중심점 높이와 같으며, 모멘트 출력 중심점 또한 무게중심이다. 소프트 스프링에 의한 복원력은 다음과 같이 계산한다. 먼저 선박이 6자유도 운동 방향으로 미소 변위(병진운동 1.0 mm, 회전운동 0.001 rad)만큼 움직였다고 가정하고 선박 연결점의 위치 변화를 계산한다. 그 후 선박 연결점의 위치변화에 따른 각 스프링의 길이 변화 및 장력을 계산한다. 계산된 장력은 각 축방향 성분으로 분해하고, 모멘트 암을 반영하여 6자유도 힘과 모멘트를 도출한다. 도출된 힘과 모멘트는 미소 변위로 나누어 주어 복원력을 계산한다.

아래의 Table 1은 대상선형인 KVLCC2의 모형스케일 (1/58)에서 정수압 복원력 및 소프트 스프링으로 인해서 추가된 복원력

의 크기를 보여주고 있다. 위의 표에서 확인 할 수 있듯이, 수평면 방향(surge, sway, yaw)으로의 복원력은 두 배치 모두 유사한 값을 보여주고 있다. 반면 스프링 배치로 인한 수직 방향 복원력을 살펴보면, 두 배치 모두 상하동요 운동의 복원력이 추가되며, 현재 적용하고 있는 X형 배치는 종동요 복원력 또한 추가되고 있다. 하지만 스프링에 의한 수직 방향 복원력의 크기는 정수압 복원력에 비해서 매우 작다. 종동요 복원력 관점에서는 다이아몬드형 배치가 더 유리하다고 볼 수 있다. 하지만 모형선 세팅 및 설치 관점에서 살펴보면, 다이아몬드형 배치는 연결선과 선박의 간섭을 피하기 위해서 선수, 선미 방향으로 연결 지그를 길게 내야 하며, 폭 방향으로 넓게 배치해야 해서 연결선의 길이가 길어져야 한다. 때문에 중량 분포, 예인전차에의 설치 등에 어려움이 있다. 반면 X형 배치는 연결선이 선박 앞뒤로 분포되기 때문에 선수, 선미에 연결지그를 길게 낼 필요가 없으며 연결선의 길이를 비교적 짧게 할 수 있기 때문에 중량 분포나 설치 등에 이점이 있다. 본 연구에서는 모형선 세팅 및 설치 관점에서 유리한 X형 배치를 사용하였다.

다음으로는 X형 배치에서 연결점의 z방향 위치에 따른 변화를 살펴보았다. 본 연구의 대상선형인 KVLCC2 선형은 무게중심점의 위치가 수선면 아래(실선 기준 -2.2 m)에 있다. 수선면 아래에 연결선이 부착된다면, 연결지그와 연결선이 수면을 교란시

Table 1 Restoring force from hydrostatic and soft-spring, (model scale, 1/58)

Item	Unit	Hydrostatic restoring	Spring system restoring	
			Present, X arrangement	Diamond Arrangement
Surge	N/m	0.0	433.8	413.0
Sway	N/m	0.0	433.8	413.0
Yaw	N.m/rad	0.0	4403.8	5943.0
Heave	N/m	48820.0	83.2 (0.17 %)	41.6 (0.09 %)
Roll	N.m/rad	1560.9	0.0 (0.00 %)	0.0 (0.00 %)
Pitch	N.m/rad	102423.5	1251.2 (1.22 %)	1.5 (0.00 %)

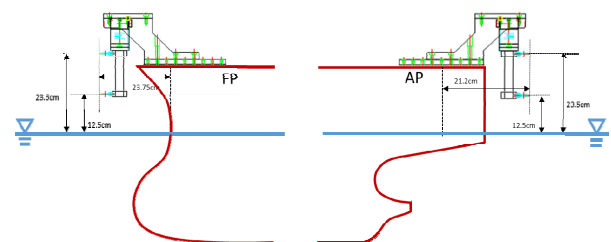


Fig. 5 Connection height of connection line

Table 2 Restoring force according to attachment height (model scale, 1/58)

Item	Unit	COG	Z = 12.5 cm	Z = 23.5 cm
		Z = -3.79 cm (real -2.2 m)	(real 7.25 m)	(real 13.63 m)
Surge	N/m	433.8	433.8	433.8
Sway	N/m	433.8	433.8	433.8
Yaw	N.m/ rad	4403.8	4403.8	4403.8
Heave	N/m	83.2 (0.17 %)	83.2 (0.17 %)	83.2 (0.17 %)
Roll	N.m/ rad	0.0 (0.00 %)	11.5 (0.74 %)	32.3 (2.07 %)
Pitch	N.m/ rad	1251.2 (1.22 %)	1262.8 (1.23 %)	1283.6 (1.25 %)

키게 되어 내항성능 평가에 좋지 않은 영향을 끼친다. 따라서 연결선을 수면 위쪽에 배치시키는 것이 유리하며, 연결선의 부착 높이로 인한 영향을 살펴보고자 하였다. 연결점의 높이는 Fig. 5와 같이 수선면에서 12.5 cm(실선 기준 7.25 m), 23.5 cm(실선 기준 13.63 m) 떨어진 위치에 대해서 평가하였다.

연결선의 부착 높이 따른 영향은 두 가지 포인트에서 살펴봐야 한다. 첫 번째는 앞에서 본 바와 같이 소프트 스프링에 의한 유체동역학적 관점에서의 복원력이며, 두 번째는 선박의 전진 속도에 의한 종경사(trim)의 변화이다. 먼저 아래의 Table 2에서 나타난 복원력을 살펴보면 연결점의 z방향 위치에 따라서 수평면 방향으로의 복원력 및 상하동요 복원력은 변하지 않는 것을 알 수 있으며, 횡동요 및 종동요의 복원력이 변화하는 것을 알 수 있다. 연결점 부착 높이가 증가함에 따라서 종동요 복원력은 증가하지만 증가량은 미미하며, 횡동요 복원력은 유의미하게 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 아래의 Table 2에서 확인할 수 있듯이, 데크 위 높이(23.5 cm, 실선 기준 13.63 m)에 연결한 경우에도 스프링에 의한 복원력의 크기는 유체정역학 복원력에 비해 크지 않음을 알 수 있다. 이에 대한 확인을 위해서 두 가지 연결점 부착 높이에서 모형시험을 수행하여 운동 및 부가저항 결과를 비교하였으며(3.4절 참고), 거의 동일한 결과가 나왔음을 확인하였다.

다음으로 선속에 의한 종경사의 변화를 확인하였다. KMLCC2 선박의 디자인 속도인 15.5 knots에서의 정수 중 저항은 모형선 스케일 (1/58)에서 대략 20.0 N 정도이며, 연결 포인트에서의 높이가 23.5 cm인 경우 발생하는 모멘트는 대략 4.7 N·m 정도이며, 이로 인한 종경사 발생량은 0.003 deg에 불과하다. 따라서 선속에 의한 종경사 변화량은 무시할 정도임을 알 수 있다.

한 가지 언급하고자 하는 점은 선박 연결점의 높이가 너무 높아지는 것은 바람직하지 않을 수 있는데, 횡동요 복원력의 크기가 과도하게 커질 수 있으며, 좌우동요와 횡동요의 연성 복원력(C<sub>24</sub>, C<sub>42</sub>) 성분 또한 커져서 감쇠시험(decay test)시에 순수한

좌우동요와 횡동요의 구현이 어려워 질 수 있다. 그리고 위의 결과는 KMLCC2에 대한 결과이며, 선박의 종류, 스프링의 강성 및 초기장력에 따라서 스프링에 의한 영향은 달라질 수 있다. 따라서 모형시험 전에 소프트 계류의 배치 및 높이에 따른 검토가 선행되어야 하며, 이에 대한 영향이 적은 방향으로 선택되어야 한다.

### 2.3 모형시험 적용된 소프트 계류 성능 확인

본 연구에서는 X형 배치를 사용하였으며, 자체 추진이 포함되지 않은 경우와 포함된 경우의 두 번의 모형시험이 수행되었다. 각각의 모형시험에 사용된 스프링의 종류와 그때의 수평면 방향 주기 및 표류거리를 추정하였으며, Table 3에 결과를 나타내었다. 수평면 방향의 주기는 아래의 식을 통해서 추정하였으며, m, m<sub>b</sub>, c는 각각 질량, 부가질량 및 복원력을 의미한다. 여기서 부가질량은 수치해석을 통해서 계산한 값을 사용하였다.

Table 3 Comparison of soft-mooring properties (model scale, 1/58)

Item	Unit	Soft-mooring w/o self propulsion	Soft-mooring w/ self propulsion
Spring Stiffness	kgf/m	20.0	31.2
Connection Height	cm	23.5 / 12.5	10.0
Tsurge	sec	12.03 (real 91.63)	10.25 (real 78.09)
Tsway	sec	16.74 (real 127.52)	12.27 (real 93.41)
Tyaw	sec	6.46 (real 49.21)	5.11 (real 38.88)
Drift distance	cm	13.59*	6.80

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m + m_a}{c}} \quad (2)$$

x방향 표류거리는 모형시험 조건에서 가장 큰 부가저항을 가지는 조건(선속 15.5 knots, 선수파, λ/L=1.1)에서의 부가저항 값을 적용해서 추정하였으며, 자체 추진이 없는 경우는 정수 중 저항에 의해서 밀려나는 거리를 포함하였다.

두 모형시험에서 스프링 강성 값을 다르게 한 이유는 자체 추진이 있는 경우 선박 가속 시 프로펠러 안정화 시간 때문에 등속 구간이 상대적으로 짧아지며, 부가저항의 정도 높은 추정을 위해서는 수평면 장주기 운동의 주기가 짧은 것이 유리하다. 따라서 자체 추진이 있는 경우 스프링 강성을 더 크게 설정하였다. 하지만 소프트 스프링 설정 시 가장 중요한 점은 운동 및 부가저항에 영향을 미치지 않는 구간에서 설정해야 한다는 점(스프링에 의한 수평면 운동의 주기는 파도 주기와 충분히 멀리 떨어져 있어야 함)이며, 두 시험 모두 이러한 원칙은 잘 지켰기 때문에 강성 값이 다르다고 해서 운동 및 부가저항에 크게 영향을 미치지 않는다.

한 가지 언급하고자 하는 점은 감속 구간 구속 장치를 잘 설계한다고 하여도 등속구간에서 수평면 장주기 운동의 크기를 줄일 수는 있어도 아예 없앨 수는 없다. 부가저항 추정을 위해서는 등속구간에서 수평면 운동의 장주기 운동이 충분히 포함되어야 한다. 그러기 위해서는 장주기 운동의 주기가 작아야 하며, 스프링 강성을 가능한 한 크게 쓰는 것이 유리하다.

### 3. 모형시험

#### 3.1 모형시험 장소, 대상선형 및 시험방법

모형시험은 선박해양플랜트연구소 심해공학수조(부산)에서 수행하였으며, 아래의 Fig. 6은 심해공학수조 전경을 보여주고 있다. 심해공학수조는 100 m X 50 m X 15 m (심해 피트 50 m) 규모를 가지며, 수심조절판을 사용하여 깊이 전 구간 수심조절이 가능하다. 파도, 조류, 바람 생성 장치를 활용하여 실제 해상환경 모사할 수 있으며, 예인 전차를 활용하여 선박의 전진속도 구현이 가능하다 (Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering, 2023).

모형시험 대상선은 KRISO 공시선형인 KVLCC2 선형이며, 주요제원은 다음의 Table 4와 같다. 모형선은 1/58 스케일로 제작되었으며, 다자인 흘수에서의 배수량은 대략 1.6톤 정도이다. 앞서 언급한 바와 같이 자체 추진이 포함되지 않은 경우, 포함한 경우 2번에 걸쳐서 부가저항 추정 시험을 수행하였으며, 아래의 Figs. 7, 8은 각각 선박 세팅 및 수조 설치 사진이다. 그림에서 알 수 있듯이, 자체 추진이 포함되지 않은 경우 프로펠러와 러더를 작동하고 제어하기 위한 시스템이 제외되기 때문에 선박 구성이 비교적 단순하다.

Table 4 Main dimensions of KVLCC2

Item	Unit	Real	Model
Scale	-	58	
Lpp	m	320.0	5.5172
Breadth	m	58.0	1.0
Draft	m	20.8	0.3586
Volume	m <sup>3</sup>	312,605.2	1.6022
LCG	m	11.136	0.192
VCG	m	18.6	0.3207
Kxx/B	-	0.4	
Kyy/L, Kzz/L	-	0.25	
Troll	sec	20.85	2.7372



Fig. 6 Overall view of the Deep Ocean Engineering Basin

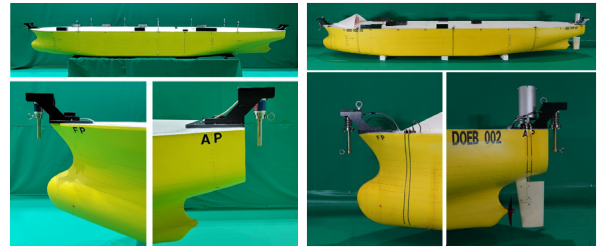


Fig. 7 Model setup (left: w/o self-propulsion, right: w/ self-propulsion)

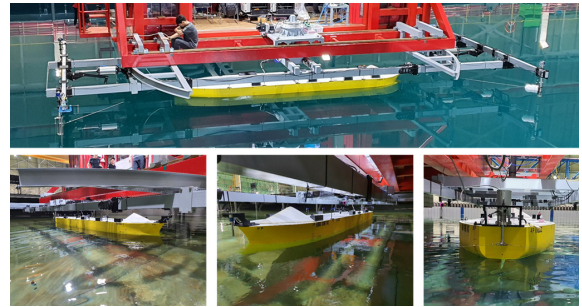


Fig. 8 Model ship installation in basin

선박은 Fig. 8과 같이 예인전차 아래쪽 견인장치에 연결되며, 예인 전차 가속 시에 구속 장치를 사용하여 전후 방향 운동을 구속한 상태에서 선박을 끌고 간다. 등속구간이 되면 구속 장치를 풀고 자유롭게 6자유도 운동을 할 수 있는 상태에서 일정 구간 등속으로 견인되며, 감속 시에도 구속 장치를 통해서 선박 전후 방향 운동을 구속하여 소프트 스프링에 과도한 힘이 가해지는 것을 방지한다. 모형선의 6자유도 운동은 광학계측시스템을 통해서 계측하였으며, 무게중심점에서의 운동을 평가한다. 선박의 부가저항을 추정하기 위해서 두 가지 종류의 센서를 사용하였다. 첫 번째는 선박의 선수, 선미 끝단 스프링이 연결되는 점에 설치한 두 개의 2축(x, y축) 로드셀이며, 두 번째는 각 연결선에 설치한 4개의 1축 장력계이다. 각각의 계측 센서를 통해서 x축 방향으로의 힘을 도출하여 부가저항을 평가하였다. 자체 추진이 포함된 시험에서는 자항동력계를 통해서 프로펠러의 추력 및 토크를 계측한다. 또한 선박 앞쪽에 파고계를 설치하여 파고를 계측하였으며, 이를 사용하여 선박의 운동의 위상차를 도출하였다.

자체 추진이 포함된 시험의 경우 프로펠러 회전수는 정수 중 특정 속도를 낼 수 있는 rps로 고정되며, 파도 중에서도 동일한 회전수를 적용한다. 선박의 속도는 전차에 의해서 제어되며, 파도 중에서도 특정 속도를 유지한다. 타는 중립 각에 고정된 상태로 시험이 수행된다. 자체 추진이 포함되지 않은 경우 부가저항은 식 (3)과 같이 파랑 중 전체 힘에서 정수 중 힘을 빼서 계산하게 된다. 반면 자체 추진이 포함된 경우 파도 중 저항뿐만 아니라 추력의 증가분 또한 고려해 주어야 한다. 따라서 식 (4)와 같이 계산된다. 여기서 T는 프로펠러 축에 연결된 자항동력계로 계측되는 추력이며, R은 소프트 계류 시스템에 연결된 로드셀로 계측되는 힘이다. t는 추력감소계수이며, 이는 KRISO 예인수조에서 수행된 정수 중 자항시험에서 도출된 값을 적용한다.

$$R_{AW, w/o prop.} = R_{wave} - R_{calm} \quad (3)$$

$$R_{AW, w/ prop.} = (T_{wave} - T_{calm})(1-t) + (R_{wave} - R_{calm}) \quad (4)$$

### 3.2 자체 추진 기능의 유무에 따른 비교

먼저 자체 추진 기능의 유무에 따른 비교를 수행하였다. 아래의 그림은 각각 선박의 속도가 4 knots, 15.5 knots이며, 규칙파 조건에서 시험한 결과를 보여주고 있다. 파향은 선수파이며, 파고는 두 시험의 경우 차이가 있다. 자체 추진이 포함되지 않은 시험의 경우 파고에 대한 선박 길이의 비,  $H/L_{pp}=1/50$ 이며, 자체 추진이 포함된 시험은  $H/L_{pp}=1/100$ 이다. 모형시험에서 입사파의 파고를 선정할 때는 상반된 두 가지 사항을 고려해야 한다. 첫 번째는 선박의 운동이 그린워터 등의 비선형 현상이 나타나지 않도록 파고가 작아야 하며(비선형 현상에 의한 부가저항의 변화를 배제하기 위함), 두 번째는 계측 센서의 정밀도가 부가저항을 계측할 수 있을 정도로 커야한다는 점이다. 두 시험에서는 모형시험의 목적성에 차이가 있었으며, 자체 추진이 없는 경우는 계측

의 정밀도에 초점을 맞추어 다소 큰 파도( $H/L_{pp}=1/50$ )에서 시험을 수행하였으며, 두 번째는 비선형 현상이 나타나지 않는 영역인,  $H/L_{pp}=1/100$ 에서 시험을 수행하였다.

파장에 따른 전후 동요, 상하 동요 및 종동요(surge, heave, pitch) 운동 응답 및 무차원화된 부가저항 값을 보여주고 있다. 각각의 그림에는 3가지 결과가 포함되어 있다. 회색 실선은 MIT에서 초기 개발되고 KRISO에서 수정 보완된 포텐셜 기반 주파수 영역 수치 해석 프로그램인 SWAN1을 적용한 결과 (Seo et al, 2021)이다. SWAN1 프로그램은 초기 버전에서 자유표면 패널의 형상 다양화, 파랑표류력 수치 해석 코드 고도화 및 방사조건 고도화(numerical damping zone)가 이루어 졌다. 포텐셜 기반 수치해석 코드의 경우 부가저항 단파장 영역에서의 해석에서 부정확한 값을 보이기 때문에 이를 보완하기 위해서 단파장 영역 보정 방법 (Tsujiimoto et al, 2008; Seo et al. 2021)을 적용하였다. 빨간색 네모 점 및 파란색 다이아몬드 점은 각각 자체 추진이 포함되지 않은 소프트 계류 시험, 자체 추진이 포함된 소프트 계류 시험 결과이다. Figs. 9, 10에서 확인할 수 있듯이, 두 시험 방법 모두 운동 RAO 및 phase가 유사한 경향을 보여주고 있으며, 수치해석 결과와도 잘 일치한다.

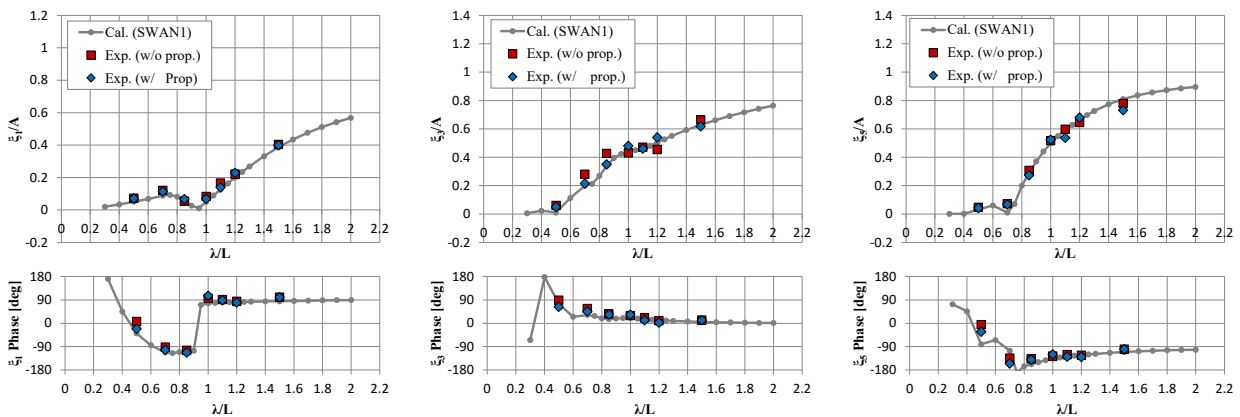


Fig. 9 Motion RAOs and phase: 4 knots, head sea (left: surge motion, mid: heave motion, right: pitch motion)

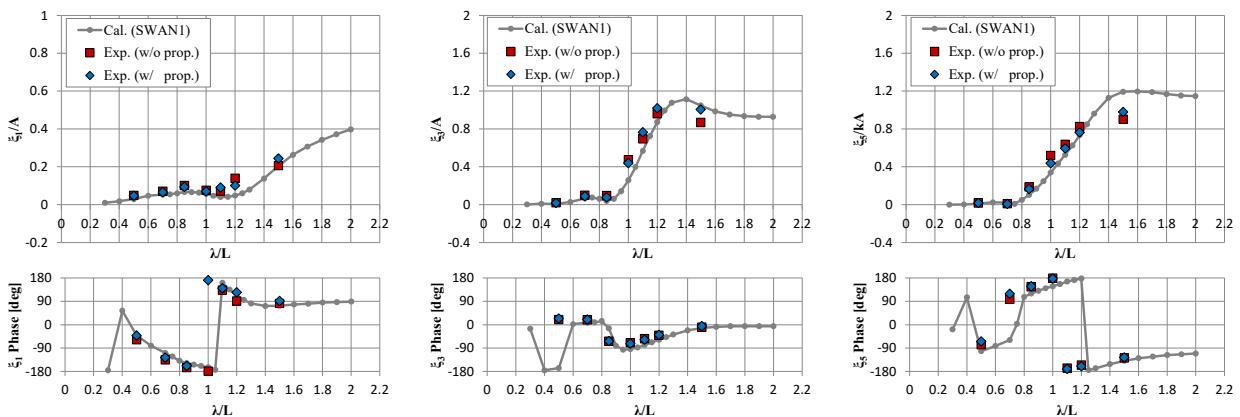


Fig. 10 Motion RAOs and phase: 15.5 knots, head sea (left: surge motion, mid: heave motion, right: pitch motion)

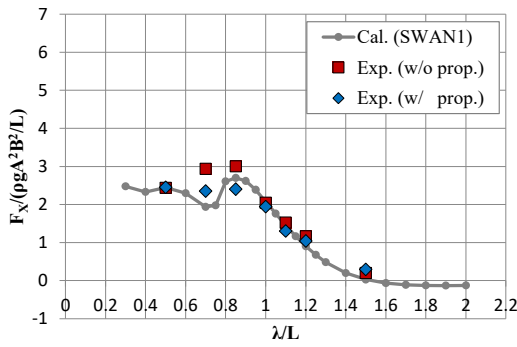


Fig. 11 Added resistance: 4 knots, head sea

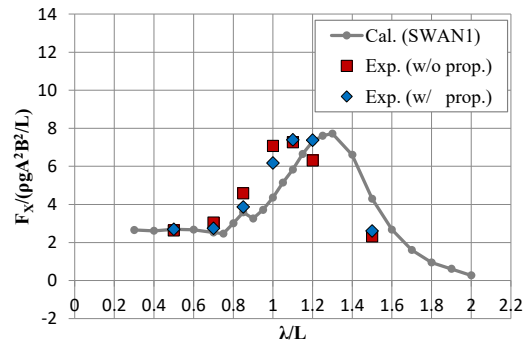


Fig. 13 Added resistance: 15.5 knots, head sea

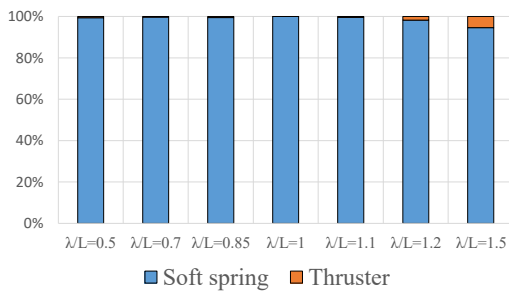


Fig. 12 Added resistance component: 4 knots, head sea

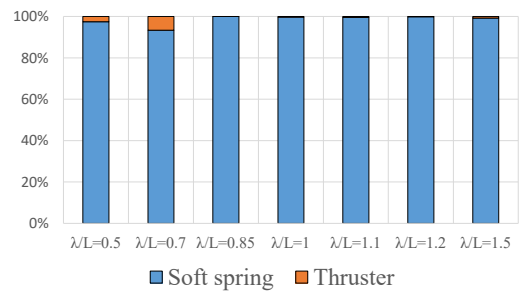


Fig. 14 Added resistance component: 15.5 knots, head sea

Figs. 11, 13은 각각 4 knots, 15.5 knots에서의 부가저항 결과를 보여주고 있다. 두 시험 기법과 수치해석의 전반적인 경향은 유사하게 나타난다. 다만 부가저항에서는 최고점 부근에서 두 시험 기법 간에 다소 차이를 보이는데 알려진 바와 같이 모형시험에서 부가저항 예측의 불확실성이 존재하며 (Park et al., 2015) 이로 인한 차이라고 보여진다. 부가저항은 실제 다루는 물리량 대비 매우 작은 값을 정확하게 예측해야 하기 때문에 불확실성이 큰 편이며, 모형시험의 수행시기, 방법 등의 차이도 존재하기 때문에 이러한 차이가 발생할 수 있다. 또한 15.5 knots에서는 부가저항 수치해석 최고 값의 위치가 장파 영역으로 치우친 것을 볼 수 있다. 이는 수치해석에서 적용된 선형화의 문제점이며, Kim et al. (2021)은 기본포텐셜의 z방향 이중 적분 값을 부가저항 수식에 포함함으로써 어느 정도 해결 가능함을 보여주었다.

Figs. 12, 14의 막대그래프는 자체 추진이 포함된 경우 부가저항 성분의 비율을 보여주고 있다. 자체 추진이 포함된 경우 부가저항은 식 (4)와 같이 추력의 증가분(자항동력계로 예측)과 저항 증가분(스프링에 연결된 로드셀로 예측)의 합으로 결정되며, 각각의 비율을 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 부가저항은 대부분 스프링에 연결된 로드셀을 통해서 예측이 되며, 추력은 파도의 유무에 따라서 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 프로펠러 rps는 정수 중에서 특정 속도를 낼 수 있는 값으로 고정된다. 또한 선박의 속도는 전차에 의해서 유지가 되며, 프로펠러에 유입되는 속도는 정수중과 동일하며, 다만 선박의 운동에 의해서 달라질 수 있지만 그 영향이 크지 않다.

### 3.3 계측 센서 종류에 따른 결과 비교

다음으로 계측 센서 종류에 따른 결과를 비교하였다. 2가지 종류의 센서를 사용하였으며, 첫 번째는 선박의 선수 선미 끝단 스프링이 연결된 점에 설치한 2개의 2축 로드셀이며, 두 번째는 각 연결선에 연결한 4개의 1축 장력계이다. 두 가지 종류 모두 스트레인지이지 타입 로드셀이며, 2축 로드셀은 x, y축 방향으로의 힘을 계측할 수 있으며, 1축 장력계는 연결선 방향의 인장력만을 계측한다. 선박의 선수, 선미에 설치된 2개의 2축 로드셀 예측 결과를 사용하는 경우, 부가저항은 두 개의 센서의 x축 힘의 합으로 나타낼 수 있다. 반면 스프링에 연결된 4개의 1축 장력계를 사용하여 부가저항을 도출하기 위해서는 Fig. 15와 같이 연결선의 배치 및 선박의 운동을 고려해야 한다. 1축 장력계를 사용한 부가저항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

선박의 운동에 의해서 선수, 선미에 연결 포인트 PS1, PS2의 좌표는 시간에 따라서 변하게 되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

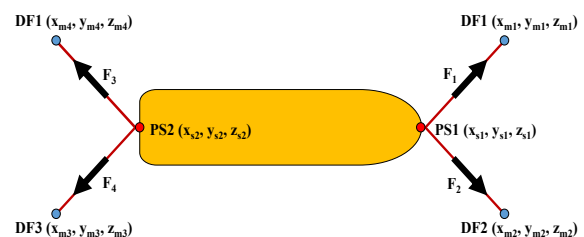


Fig. 15 Definition of soft-spring connection point



$$\begin{aligned} x_{s1,2}(t) &= \xi_1(t) + \xi_5(t) \cdot z_{s1,2}(0) - \xi_6(t) \cdot y_{s1,2}(0) \quad (5) \\ y_{s1,2}(t) &= \xi_2(t) - \xi_4(t) \cdot z_{s1,2}(0) + \xi_6(t) \cdot x_{s1,2}(0) \\ z_{s1,2}(t) &= \xi_3(t) + \xi_4(t) \cdot y_{s1,2}(0) - \xi_6(t) \cdot x_{s1,2}(0) \end{aligned}$$

여기서  $\xi$ 는 6자유도 운동을 나타낸다. 네 개의 연결선의 실시간 거리,  $r$ 과 극좌표계 각도  $\theta$ ,  $\phi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{1,2} &= \sqrt{(x_{s1}(t) - x_{m1,2})^2 + (y_{s1}(t) - y_{m1,2})^2 + (z_{s1}(t) - z_{m1,2})^2} \quad (6) \\ r_{3,4} &= \sqrt{(x_{s2}(t) - x_{m3,4})^2 + (y_{s2}(t) - y_{m3,3})^2 + (z_{s2}(t) - z_{m3,4})^2} \end{aligned}$$

$$\theta_{1,2} = \cos^{-1} \frac{z_{s1}(t) - z_{m1,2}}{r_{1,2}} \quad (7)$$

$$\theta_{3,4} = \cos^{-1} \frac{z_{s2}(t) - z_{m3,4}}{r_{3,4}}$$

$$\phi_{1,2} = \tan^{-1} \frac{y_{s1}(t) - y_{m1,2}}{x_{s1}(t) - x_{m1,2}} \quad (8)$$

$$\phi_{3,4} = \tan^{-1} \frac{y_{s2}(t) - y_{m3,4}}{x_{s2}(t) - x_{m3,4}}$$

위의 값을 사용하여 각 x축 방향 힘의 합력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_X &= F_1 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\phi_1 + F_2 \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\phi_2 \\ &\quad - F_3 \cdot \sin\theta_3 \cdot \cos\phi_3 - F_4 \cdot \sin\theta_4 \cdot \cos\phi_4 \quad (9) \end{aligned}$$

여기서  $F_i$ 는 각각 1축 로드셀에서 계측된 힘을 나타내며, 초기장력까지 포함된 힘을 적용해야 한다.

Fig. 16은 두 가지 타입의 센서를 사용해서 도출한 x방향 힘의 시계열을 보여주고 있으며, Fig. 17은 4 knots에서의 두 가지 타입의 센서를 사용해서 도출한 부가저항을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 센서 타입별 결과가 동일한 값을 보여주는 것을 알 수 있다. 선박의 운동까지 고려한다면 스프링에 연결된 1축 장력

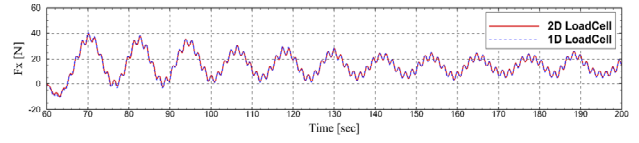


Fig. 16 Time series of Fx from 2 types sensors

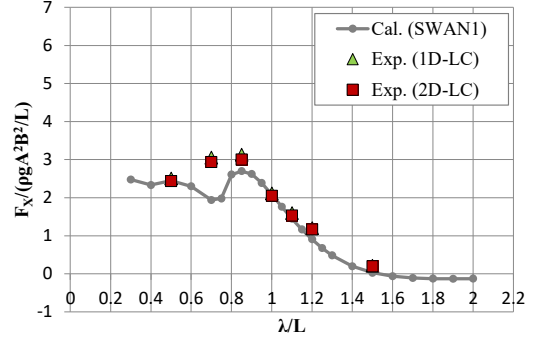


Fig. 17 Added resistance from 2 types sensors: 4knots

계를 통해서도 부가저항을 비교적 정확하게 도출 가능하다는 것을 알 수 있다.

### 3.4 소프트 스프링 부착 높이에 따른 결과 비교

마지막으로 스프링의 부착 높이에 따른 결과를 살펴보고자 한다. 자체 추진이 포함되지 않은 경우에 소프트 스프링 부착 높이를 다르게 하여 시험을 수행하였으며, 운동 및 부가저항 결과를 비교하였다. Fig. 18은 6자유도 운동 시계열을 보여주고 있으며, 선속 4 knots, 선수사파 (120 deg),  $\lambda/L=0.85$ 에서의 결과이다. 붉은색 실선은 스프링 부착 높이가 높은 경우(수선면 위 23.5 cm)이며, 파란색 점선은 스프링 부착 높이가 상대적으로 낮은 경우(수선면 위 12.5 cm)이다. 앞서 언급한 바와 같이 현재 모형시험은 감가속 구속 장치를 활용하며, 감가속 장치를 풀어주는 시점에 따라서 전후 동요 시계열의 장주기 운동이 시작되는 시점이 달라진다. 이로 인해서 전후 동요 장주기 운동의 시간이력이 발생된 것으로 보인다.

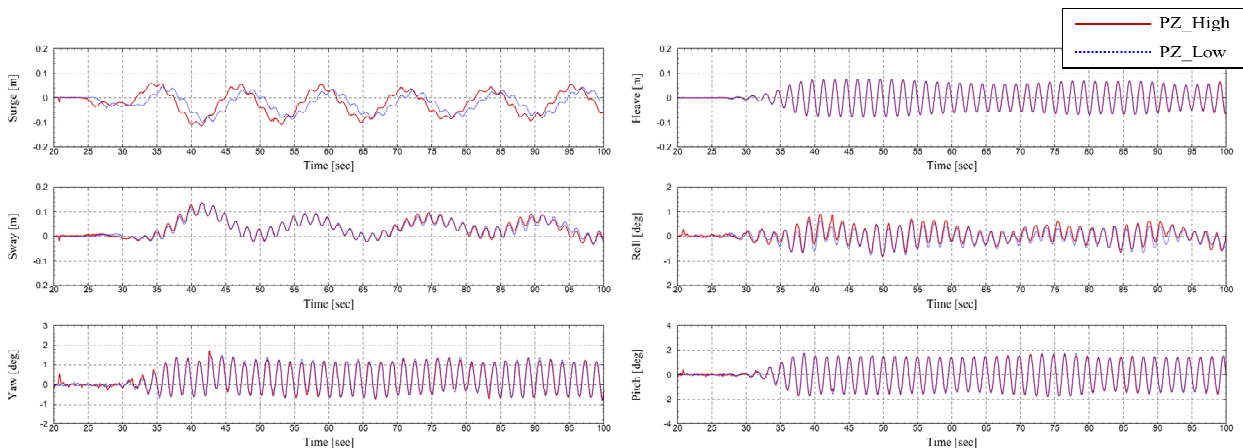


Fig. 18 Time histories of 6DOF motion: 4 knots, oblique wave (120 deg),  $\lambda/L=0.85$

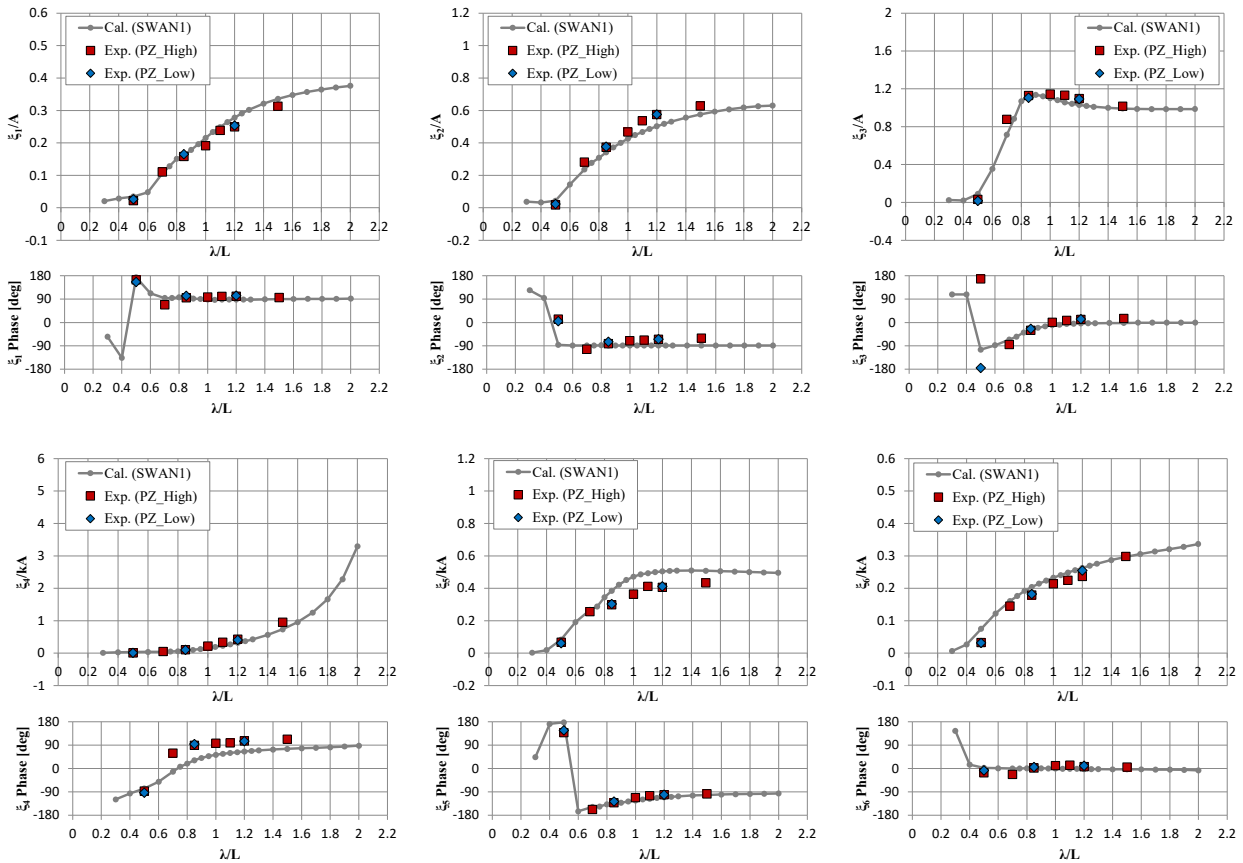


Fig. 19 6DOF Motion RAOs and phase: 4 knots, oblique wave (120 deg)

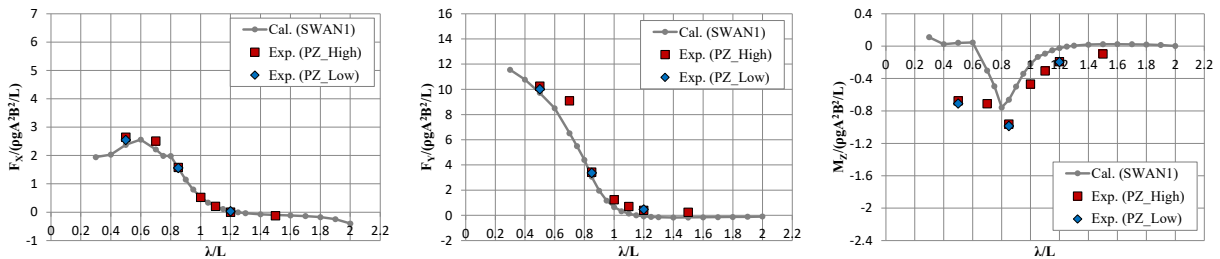


Fig. 20 Wave drift force and moment: 4 knots, oblique wave (120 deg)

Figs. 19, 20은 각각 선수사파(120 deg)에서의 6자유도 운동 RAO와 부가저항을 포함한 파랑 표류력을 나타낸다. 빨간색 사각 점은 연결선 부착 높이가 높은 경우(수선면 위 23.5 cm)이며, 파란색 다이아몬드 점은 연결선 부착 높이가 상대적으로 낮은 경우(수선면 위 12.5 cm)이다. 앞서 확인한 바와 같이 스프링 부착 높이가 가장 크게 영향을 미치는 것은 횡동요 복원력이며, 부착 높이가 높을수록 스프링에 의해서 추가되는 횡동요 복원력이 크다. 하지만 아래의 그림에서 확인할 수 있듯이, 주요 성능 지표인 6자유도 운동 RAO, 부가저항을 포함한 파랑 표류력의 거의 동일하게 나타난다. 횡동요 시계열을 자세히 살펴보면, 횡동요의 진폭은 거의 동일하게 나타나지만 횡경사 값이 0.1 deg 정도 미세하게 달라지는 것을 알 수 있다. 즉 스프링 연결선의 부착 높

이가 높아짐에 따라서 횡동요 복원력이 커지며, 횡경사 값이 작아지는 현상이 발생한다. 현재의 시험에서는 그 차이는 크지 않으며, 무시할 만 하다고 생각되지만 선형에 따라서 혹은 입사파의 크기에 따라서 차이가 날 수 있으며, 이에 대한 선행 검토는 필요할 것으로 생각된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 파랑 중 부가저항을 평가하기 위한 모형시험 기법을 검토하였으며, 그중 소프트 계류 방법을 적용하여 선박해양플랫폼연구소 심해공학수조(부산)에서 모형시험을 수행하였다.

소프트 계류 시험 방법은 자체 추진 기능을 포함할 수 있는데, 자체 추진 기능이 포함된 경우와 포함되지 않은 경우 두 가지에 대해서 모형시험을 수행하여 비교 검토 하였다. 또한 소프트 계류 시험 방법은 스프링 배치가 중요한 요소인데 이에 따른 영향을 선행 검토하였으며, 모형시험에서의 영향을 확인하였다. 본 연구에서 확인한 사항은 다음과 같다.

- 부가저항 계측을 위한 다양한 모형시험 기법을 검토하였으며, 그 중 소프트 계류 시험 방법에 대해서 구체적으로 살펴 보았다. 소프트 계류 시험 방법은 구속 모형시험에 비해서 자유도가 높으며, 자유 항주 모형시험에 비해서는 시험 구성이나 방법이 단순하여 쉽게 적용이 가능하다. 또한 선 수파뿐만 아니라 다른 모든 파향에서 시험이 가능하기 때문에 다방향에서의 파도 생성이 가능한 심해공학수조에서 적용하여 부가저항 계측 시험을 수행하였다.
- 소프트 계류 모형시험에서 소프트 스프링의 배치, 강성 및 초기 장력의 선택은 매우 중요한 요소이다. 이를 선택할 때 서로 상충되는 아래의 세 가지 사항을 고려해야 한다. 첫 번째는 파도에 의해서 밀려나는 거리가 운동 허용 범위 벗어나면 안 되기 때문에 스프링 강성이 클수록 유리하다. 두 번째는 스프링으로 인해서 발생하는 수평면 방향의 장주기 운동이 파도 주기에서 충분히 벗어나는 지점에 위치해야 하기 때문에 스프링 강성이 작을수록 유리하다. 세 번째는 소프트 스프링에 의해서 발생하는 수직면 방향의 복원력이 정수압에 의한 복원력에 비해서 무시할 수 있을 만큼 작아야 하기 때문에 스프링 강성이 작을수록 유리하다. 따라서 모형 시험 전 소프트 스프링의 영향을 선행적으로 평가하고, 적합한 방법을 선택해야 한다.
- 소프트 계류 배치 형태는 선박의 운동 관점에서 다이아몬드 형태가 가장 바람직하지만, 연결선과 선박의 간섭을 피하기 위해서 선박의 길이 방향으로 연결지그를 길게 연결해야 하며, 전차에 연결되는 부분도 y방향으로 다소 넓게 벌어져야 하는 등, 선박 세팅이나 모형선 설치 관점에서 어려움이 있다. X형 배치의 경우 스프링에 의한 중동요 복원력 모멘트가 발생하지만 수용 가능한 정도이며, 선박 중량 분포, 모형선 설치 관점에서 다이아몬드 형태보다 유리하다. 사용되는 스프링의 강성, 예인전차를 포함한 시험 설비의 형태에 따라서 적합한 배치를 선택하는 것이 필요하다.
- 소프트 계류 시험 방법에서 연결선의 부착 높이는 횡동요 운동에 유의미하게 영향을 끼칠 수 있다. 연결 높이가 높아질수록 스프링에 의한 횡동요 복원력이 증가하며, 좌우 동요와의 연성 복원력 또한 발생한다. 연결선의 부착 높이에 따른 횡동요 복원력은 모형시험 전 선행적으로 확인하고 적절한 높이를 선정하는 것이 필요하다.
- 소프트 계류 모형시험에서 자체 추진을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 운동 및 부가저항 결과는 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 자체 추진이 없는 경우 선박 시스템

구성이 단순해지는 장점이 있지만, 선속에 의한 저항을 소프트 스프링이 감당해야 하며, 평균위치가 뒤로 밀린 상태에서 운동을 하게 된다. 이로 인한 스프링 비대칭력 (sway-yaw 연성 복원력)이 나타나며 내항성능 평가 관점에서 마이너스 요소가 된다. 반면 자체 추진이 포함된 경우 프로펠러와 러더의 구동, 제어 및 계측부가 포함되어야 하기 때문에 시스템 구성이 복잡해지며, 본 모형시험 전 확인해야 될 사항(선속별 프로펠러 rps 추정 등)이 늘어나 시험 비용이 증가한다. 하지만 선박의 선속에 의한 저항 성분은 프로펠러 추력이 감당하게 되며, 평균위치가 초기 위치에서 크게 벗어나지 않게 된다. 따라서 이상적인 소프트 계류 상태에서 시험을 수행할 수 있다는 장점이 있으며, 파도에 의한 추진성능 변화 또한 확인할 수 있다. 각각의 장단점을 확인하면서 모형시험의 목적에 맞는 시험 방법을 선택하는 것이 필요하다.

## 후 기

본 논문은 해양수산부 재원으로 선박해양플랜트연구소의 주요 사업인 “극한환경 상태의 평가기술개발”에 의해 수행되었습니다. (1525014865, PES4730)

## References

- Amaral, G.A., Pesce, C.P. and Franzini G.R., 2022. Mooring system stiffness: A six-degree-of-freedom closed-form analytic formulation. *Marine Structures*. 84, 103189.
- International Maritime Organization, 2021. *Guidelines for Determining Minimum Propulsion Power to Maintain the Manoeuvrability of Ships in Adverse Conditions*. MEPC.1/Circ.850/Rev.3.
- International Towing Tank Conference, 2014. *Seakeeping tests.*, ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-05-04.
- International Towing Tank Conference. Seakeeping Committee, 2021. *The Seakeeping Committee Final Report and Recommendations to the 29<sup>th</sup> ITTC*.
- Kim, T., Yoo, S. and Kim, H.J., 2021. Estimation of added resistance of an LNG carrier in oblique waves. *Ocean Engineering*. 231, 109068.
- Kim, Y., Park, D.M., Lee, J.H., Lee, J., Kim, B.S., Yang, K.K., Oh, S. and Lee, D.Y., 2019. Numerical analysis and experimental validation of added resistance on ship in waves. *Journal of Ship Research*. 63(4), pp.268-282.
- Kjellberg, M. and Gerhardt, F.C., 2019. Improved methods for the experimental determination of added resistance in waves. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on*

- Advanced Model Measurement Technology (AMT)*. Rome, Italy.
- Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering, 2023. *Deep Ocean Engineering Research Center*, URL: <https://www.kriso.re.kr/menu.es?mid=a10202000000> [Accessed 20 July 2023]
- Lee, J.H., Kim, Y., Kim, B.S. and Gerhardt, F., 2021. Comparative study on analysis methods for added resistance of four ships in head and oblique waves. *Ocean Engineering*. 236, 109552.
- Lee, J., Park, D.M. and Kim, Y., 2017. Experimental investigation on the added resistance of modified KVLCC2 hull forms with different bow shapes. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 231(2), pp.395–410.
- Liu, S. and Papanikolaou, A., 2020. Regression analysis of experimental data for added resistance in waves of arbitrary heading and development of a semi-empirical formula. *Ocean Engineering*. 206, 107357.
- Liu, S. and Papanikolaou, A., 2023. Improvement of the prediction of the added resistance in waves of ships with extreme main dimensional ratios through numerical experiments. *Ocean Engineering*. 273, 113963.
- Lu, J., Gu, M. and Umeda, N., 2016. A study on the effect of parametric roll on added resistance in regular head seas. *Ocean Engineering*. 122, pp.288–292.
- Park, D.M., Kim, Y., Seo, M.G. and Lee, J., 2016. Study on added resistance of a tanker in head waves at different drafts. *Ocean Engineering*. 111, pp.569–581.
- Park, D.M., Lee, J.H., Jung, Y.W., Lee, J., Kim, Y. and Gerhardt, M., 2019. Experimental and numerical studies on added resistance of ship in oblique sea conditions. *Ocean Engineering*. 186, 106070.
- Park, D.M., Lee, J. and Kim, Y., 2015. Uncertainty analysis for added resistance experiment of KVLCC2 ship. *Ocean Engineering*. 95, pp.143–156.
- Saettone, S., Taskar, B., Steen, S. and Andersen, P., 2021. Experimental measurements of propulsive factors in following and head waves. *Applied Ocean Research*. 111, 102639.
- Seo, M.G., Ha, Y.J., Nam, B.W. and Kim, Y., 2021. Experimental and numerical analysis of wave drift force on KVLCC2 moving in oblique waves. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9(2), pp.136.
- Seo, M.G., Park, D.M., Yang, K.K. and Kim, Y., 2013. Comparative study on computation of ship added resistance in waves. *Ocean Engineering*. 73, pp.1–15.
- Shiginov, V., Mortar, O., Papanikolaou, A., Potthoff, R. and Liu, S., 2018. International benchmark study on numerical simulation methods for prediction of manoeuvrability of ships in waves. *Ocean Engineering*. 165, pp.365–385.
- Shivachev, E., Khorasanchi, M., Day, S. and Turan, O., 2020. Impact of trim on added resistance of KRISO container ship (KCS) in head wave: An experimental and numerical study. *Ocean Engineering*. 211, 107594.
- Tsujimoto, M., Shibata, K., Kuroda, M. and 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.177–184.
- Zheng, M., Ni, Y., Wu, C. and Jo, H., 2021. Experimental investigation on effect of sloshing on ship added resistance in head waves. *Ocean Engineering*. 235, 109362.



서민국



박인보



박동민



황승현