

부가저항 실험의 불확실성 연구

박동민·이재훈·김용환[†]
서울대학교 조선해양공학과

Uncertainty Study of Added Resistance Experiment

Dong-Min Park·Jaehoon Lee·Yonghwan Kim[†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

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

In this study, uncertainty analysis based on ITTC(International Towing Tank Conference) Recommended Procedures is carried out in the towing-tank experiment for motion responses and added resistance. The experiment was conducted for KVLCC2 model in head sea condition. The heave, pitch and added resistance were measured in different wave conditions, and the measurement was repeated up to maximum 15 times in each wave condition in order to observe the uncertainty of measured data. The uncertainty analysis was carried out by adopting the ISO-GUM(International Organization for Standardization, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements) method recommended by ITTC. This paper describes the details about the analysis method, uncertainty and the measured uncertainty for each source. The uncertainty analysis results are summarized as a tabular form. To validate the accuracy of the present measurement, the experimental results are compared with the results of numerical computation and other experiment. From the present uncertainty analysis, the main sources of uncertainty are identified, which can be very useful to improve the accuracy for added resistance experiment.

Keywords : Uncertainty analysis(불확실성 해석), Added resistance(부가저항), Seakeeping experiment(내항성 실험), KVLCC2 hull(KVLCC2 선형), EEDI(에너지효율 설계지수)

1. 서론

최근 세계적으로 관심의 대상이 되고 있는 친환경 운동과 관련하여 EEDI(Energy Efficiency Design Index)와 같은 선박의 온실가스 배출량에 대한 규제가 구체화 되면서, 온실가스 배출량을 감소하기 위해서 파랑 중 선박저항에 대한 관심이 증가하고 있다. 선박유체역학적 관점에서는 추진효율의 향상을 위한 효율적인 기술개발과 함께 해양에서의 선박의 전체 저항을 줄이는 것이 산업체의 중요한 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 산업계의 기술수요에 발맞추어 파랑 중 선박저항, 즉 부가저항에 대한 실험 및 수치적 연구가 많이 수행되고 있다. 기존의 실험적 연구를 살펴보면 실험의 결과는 기관에 따라서 차이가 있으며 동일한 기관에서 수행한 동일한 실험 조건의 실험도 부가저항 값이 분산되어 있다. 따라서 실험으로부터 얻은 부가저항 값의 신뢰도를 확보하기 위해서는 실험의 불확실성 해석이 필요하며, 이 결과는 수치적 연구의 검증용으로도 유용하게 이용될 수 있다.

실험에서 계측의 불확실성은 실험의 신뢰도를 말해주는 아주 중요한 요소이다. 실험의 불확실성을 제시하지 않은 실험은 받아들일 수 없다(Moffat, 1988)는 논의가 있을 만큼 실험의 결과를

제시할 때 계측된 결과의 불확실성을 함께 제시해야 하는 것이 점차 일반화되고 있다.

불확실성에 대한 연구는 AIAA(American Institute of Aeronautics and Astronautics)와 ASME(American Society of Mechanical Engineers)에서 많이 진행되었다. 또한 Coleman and Steele (1995)는 불확실성 해석 방법을 자세하게 기술하였으며, 기존에 제시된 불확실성 해석 방법들을 비교하였다. 선박해양유체역학 분야에서의 불확실성 해석은 실험의 정확도를 높이기 위하여 최근 관심을 많이 받고 있으나, 여러 현실적인 문제들로 인해 아직은 보편적으로 이루어지지 못하고 있다. 그러나, 해석의 기본 개념과 일반화된 절차들은 ITTC(International Towing Tank Conference)를 통해 점차 체계화되고 있다.

ITTC가 제안하는 실험의 불확실성 해석은 2005년 이전까지 AIAA (1995)의 방법을 채택하였으나, 2005년 이후에는 ISO (International Organization for Standardization, 1995)의 방법을 채택하여 제시하고 있다. 이 방법에서는 불확실성 인자들을 반복 실험을 통해 관찰될 수 있는 불확실성과 계측장비나 계측기법에서 정의될 수 있는 오차에 대한 불확실성으로 크게 나누어 이들을 각각 구하고, 이들을 합산하는 방법으로 전체 불확실성을 관

찰하게 된다. 하지만, 반복실험에 대한 시간적, 비용적 문제가 심각한 모형실험, 특히 내항성이나 조종성 실험 등의 분야에서는 체계적인 불확실성의 해석이 현실적으로 쉽지 않은 것이 사실이다.

선박유체역학 분야에서의 실험에 대한 불확실성 연구는 비교적 반복실험의 부담이 타 분야에 비해 적은 저항과 추진 분야에서 주로 소개되어 왔다. 1990년대 초기, 일본에서 선박의 저항 추진시험 (Nishio, et al., 1991)의 불확실성 해석을 수행하였으며, Longo and Stern (2005) 등의 해석도 주목할만 하다. 상대적으로 반복실험이 부담스럽고 다루어야 하는 실험관련 인자들이 많은 내항성 분야에서는 기존 연구들이 대단히 한정적인데, 이런 점에서 Yum, et al. (1993)이 수행한 선박의 운동에 대한 불확실성 해석은 큰 의미가 있는 연구라 할 수 있다. 이후 Irvine, et al. (2008) 등과 같은 선박의 운동에 대한 불확실성 해석결과들이 있기는 하나, 아직은 연구대상이 비교적 단편적인 범위에 머무르고 있다.

부가저항 모형시험은 1970년대부터 Series 60 선형 (Gerritsma & Beukelman, 1972; Storm-Tejsen, et al., 1973), S175 컨테이너선 모델 (Fujii & Takahashi, 1975; Nakamura & Naito, 1977), Wigley 모델 (Journee, 1992) 등에 대한 실험적 연구가 많이 진행되었다. 최근 Kuroda, et al. (2012)은 컨테이너선 기본선형을 기준으로 선수부의 형상을 다양하게 변화시켜가면서, 이에 따른 부가저항 변화를 살펴보았다. 또한, Lee, et al. (2013)도 최근 KVCC를 대상으로 한 선수형상의 변화에 따른 부가저항 실험을 수행하고 계측값과 수치계산결과를 비교한 바 있다. 선수부의 형상변화에 따른 부가저항의 변화를 파악하기 위해서는 계측 부가저항 값에 대한 높은 신뢰도가 요구된다. 그러나 아직까지도 부가저항 실험에 대한 체계적 불확실성 연구는 소개된 바 없다.

본 연구에서는 ITTC-Recommended Procedures and Guidelines (2011a)에 준하여 1/100 크기의 KVCC2 선형의 모형실험을 수행하고 운동 및 부가저항의 불확실성 해석을 하였다. 모형시험은 서울대학교 선형수조에서 수행되었으며, 실험은 선수 규칙과 조건에서 9개의 파장조건에 대해서 최소한 2번의 반복실험을 수행하였고, 9개의 조건 중에서 3개의 파장조건에 대해서는 15번 이상의 반복실험을 수행하여 불확실성 해석을 수행하였다. 본 연구의 정확도를 확인하기 위하여 기존의 모형실험 결과 및 계산결과와 실험 결과를 비교하였으며, 이로부터 기존의 실험 및 계산결과가 전반적으로 95%의 신뢰구간에 있는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 이러한 부가저항의 체계적 불확실성 해석을 통해 관찰된 오차들에 대해 정리하였으며, 본 실험연구에서 최종 관찰된 운동성능과 부가저항의 계측에서의 불확실성의 범위를 소개하였다.

2. 배경 이론

2.1 불확실성 해석법

본 연구에서는 ITTC의 불확실성 해석절차 (2011a)에 준하여 실험의 불확실성을 해석하였다. ITTC에서는 ISO-GUM (International Organization for Standardization, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements; ISO, 1995)를 실험의 불확실성을

해석하기 위한 방법으로 채택하고 있다. 이 해석방법을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

불확실성을 해석하기 위해서 불확실성의 평가방법에 따라서 2가지의 범주(Type A, Type B)로 구분한다. Type A 불확실성은 표준편차로 표시되며 $u(\bar{q})$ 로 나타낸다. Type A 불확실성은 실험과정의 무작위성으로부터 기인되는 불확실성이 성분으로, 같은 실험의 반복 측정을 통해서 평가된다. Type B 불확실성은 반복 측정을 통한 통계적 평가방법을 제외한 모든 방법을 포함하는 불확실성이다. 통계적 평가방법을 제외한 모든 방법에는 과거의 측정값 및 경험, 일반적인 지식, 장비 설명서 등이 있다. Type B 불확실성도 분산 또는 표준편차로 표시되며, 각각 u_i^2 , u_j 로 나타낸다.

표준 불확실성(standard uncertainty), $u(y)$ 는 Type A와 Type B의 합으로 정의되며, 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

$$u(y) = \left(\sum_{i=1}^N u_i^2(\bar{q}) + \sum_{j=1}^K u_j^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

실험의 결과값이 여러 가지 변수들의 함수 ($y = f(x_1, x_2, \dots)$)로 표현되는 경우, 결합 불확실성(combined uncertainty)이라는 불확실성을 정의함으로써 결과값의 불확실성을 표시한다. 결합 불확실성은 $u_c(y)$ 로 표시되며, 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$u_c(y) = \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기에서 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 는 변수 x_i 의 민감도 계수(sensitivity coefficient)이며, 두번째 항은 변수들의 상호연관성을 나타낸다. 만약 변수들이 서로 독립적이면, 이 항은 고려할 필요가 없다.

실험의 결과값을 신뢰구간으로 표시하는 경우 다음과 같은 식으로 정의되는 확장 불확실성(expanded uncertainty)를 적용할 수 있다.

$$U = k u_c(y) \quad (3)$$

여기에서 k 값은 신뢰도에 따라서 변하는 값으로, 95%의 신뢰도는 2의 값을 가진다. 결국 실험값의 불확실성은 최종적으로 $y - U \leq Y \leq y + U$ 로 표현된다.

불확실성 해석법에 대한 보다 자세한 내용은 ITTC-Recommended Procedures and Guidelines (2011a)에 제시되어 있다.

2.2 부가저항 실험의 불확실성 요소

부가저항 실험의 불확실성 해석에 영향을 미치는 요소들은 일곱 가지로 분류할 수 있다.

측정장비의 불확실성: 실험에서 사용되는 장비들을 이용한 계

측값은 불확실성을 가지고 있으며 이 불확실성은 실험의 모든 값에 영향을 미친다.

모형선 형상의 불확실성: 실험에 사용된 모형선은 제작과정 및 시간의 경과에 따른 형상의 변형에 의해서 불확실성을 가질 수 있다. 이러한 모형선 형상의 불확실성은 선박의 배수량 및 접수 표면적에 영향을 미쳐서 실험 결과에 영향을 미친다.

질량분포의 불확실성: 질량분포의 불확실성은 모형선의 무게 중심의 높이와 관성반경을 맞추는 과정에서 발생하는 불확실성이다.

모형선 및 장비의 설치에서 발생하는 불확실성: 모형선을 설치, 파고계의 설치 등에서 불확실성이 발생하며 이 불확실성은 실험의 계측값에 직접적인 영향을 미친다.

측정장비의 교정(calibration) 불확실성: 교정은 측정의 전 과정에서 발생하는 불확실성을 포함하기 때문에, 측정장비의 불확실성과 설치에서 발생하는 불확실성을 일부 포함한다.

측정의 불확실성: 실험값의 계측부터 얻은 시계열에서 시계열의 진폭, 평균값, 위상 등을 얻는 과정에서 발생하는 불확실성이다.

DRE(Data Reduction Equation): 각각 측정된 값들은 DRE에 따라서 실험의 최종결과로 나타내어지는데, 각각의 불확실성이 DRE를 통해서 최종 실험의 불확실성으로 나타나게 된다.

본 연구에서는 이러한 일곱가지의 요소에 대한 불확실성 해석을 수행하여 각각의 요소들이 부가저항에 미치는 영향을 파악하였다.

2.3 부가저항 모형 시험 방법

ITTC 에서 제시된 부가저항 시험 방법 (ITTC, 2011b)은 식(4)와 같다.

$$R_A = \bar{R} - R_0 \quad (4)$$

여기서, R_A 는 파랑 중 부가저항, \bar{R} 는 파랑 중 전저항(total resistance)의 시간평균, R_0 는 정수 중 저항값을 의미한다. 따라서, 부가저항을 계측하기 위하여서는 정수 중 저항도 계측하여야 하며, 본 실험연구에서는 정수 중 저항값을 10회 이상 계측하여 그 평균값을 이용하였다. 저항값을 10회 이상 계측하고 평균값을 사용한 이유는 저항값은 부가저항 계측의 근간이 되는 값으로 부가저항 실험을 하기 전후에 작은 차이가 계측되었다. 이 부분을 보완하기 위해서 부가저항 실험 전에 5번 이상, 부가저항 실험 후에 5번 이상의 저항을 계측하고 이 평균값을 이용하였다. 파랑 중 부가저항 계측을 위한 전저항의 계측은 장파(long wave)와 단파(short wave)영역을 모두 포함하는 파의 주기를 대상으로 하여 수행되었으나, 불확실성 해석을 위한 반복실험은 세가지의 다른 파장의 경우에 집중하여 수행되었다. 실험 데이터의 분석에 대해서는 3.7 실험결과 해석 방법에 자세하게 설명하였다.

3. 모형실험 방법 및 실험장치의 불확실성

3.1 선형수조

모형시험이 이루어진 서울대학교 선형수조는 길이 110m, 폭 8m, 깊이 3.5m의 콘크리트 벽 형태의 수조이다. 수조는 최대 속도 5m/s로 작동 가능하며 0.01~0.5m/s²의 가속도를 가진 예인전차를 구비하고 있다. 수조의 한 쪽 면에는 플린저 형(plunger type)의 조파기가 설치되어 있어서, 파고 0.002~0.5m의 파를 생성할 수 있다. 본 연구에서는 조파기로부터 11m 떨어진 위치에 초음파 파고계를 설치하여 생성된 파를 측정하였다. 파고계의 위치는 조파기에서 발생하는 국부파(local wave)가 충분히 소멸되어 영향을 미치지 않는 위치에 설치되었다. 수조의 측면 및 정면에 소파기가 설치되어 실험이 끝난 후에 효과적인 소파가 가능하며 이는 모형시험에서 실험 수행 중간에 대기 시간을 단축할 수 있다.

3.2 대상 모형선

실험의 대상선형은 한국해양과학기술원(MOERI)에서 공개하여 국제공동연구에 많이 사용되는 KVLCC2를 선정하였다. 본 연구에서의 모형선 축척비는 1/100이고, 빌지킬, 타, 프로펠러 등의 부가물은 부착하지 않았다. 선박의 앞부분에서 청파(green water)를 방지하기 위해서 아크릴을 이용하여 수직벽을 세웠다. 모형선의 무게중심 및 관성반경을 조절하기 위해서 Fig. 1에서와 같이 추를 상하 및 전후로 이동할 수 있는 거치대를 설치하였다. 모형선의 오차는 과거의 경험 및 일반적인 모형선의 허용오차를 참고 (ITTC, 2011c)하여 결정되었으며, Table 1에 정리하였다.

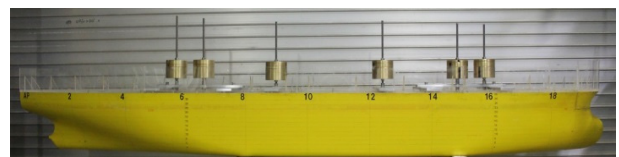


Fig. 1 Model ship: KVLCC2

Table 1 Principal dimensions of test model

Item	Full Scale	Model (1/100 scale)	Type B uncertainty
Lpp (m)	320.0	3.200	1.600E-03
Breadth (m)	58.0	0.580	1.000E-03
Depth (m)	29.0	0.290	1.000E-03
Draft (m)	20.8	0.208	1.000E-03

3.3 계측장비 구성

Fig. 2는 실험에 사용된 계측 장비의 구성도를 보여 준다. 선

박의 운동은 4자유도 운동계측장비를 이용하여 계측하였는데, 횡동요(roll) 운동을 고정한 상태에서 전후동요(surge), 상하동요(heave), 종동요(pitch)를 계측하였다. 운동 변위의 계측은 포텐셔미터(potentiometer)를 이용하였으며, 모형시험에 앞서 센서 교정을 수행하여 계측의 정확도를 확보하였다. Fig. 3에는 4자유도 운동계측장비와 계측장치들을 장착한 모형선을 보여준다.

저항의 계측은 1분력 로드셀(load cell)을 이용하였다. 1분력 로드셀은 상하동요 봉(heave bar)와 종동요 짐벌(pitch gimbal) 사이에 설치되어 저항값을 계측하였다. 또한 모형선의 앞에 용량식 파고계를 설치하여 파를 계측하였다. 실험 데이터들은 필터의 적용 없이 200Hz로 계측하였다.

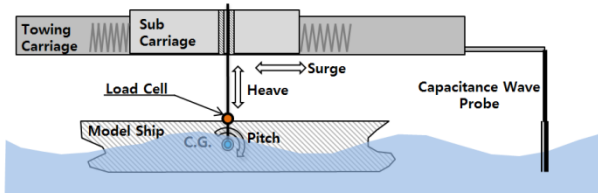


Fig. 2 Diagram for measuring device system



Fig.3 Test model equipped to towing carriage

3.4 실험 조건

실험은 선박의 설계속도인 $Fn=0.142$ 에서 진행되었으며, 선수파의 상태에서 $0.3L_{pp} \sim 2.0L_{pp}$ 범위 내 9가지의 파장에 대한 실험을 수행하였다. 파의 진폭은 0.016m로 고정하였으며 진폭과 이에 따른 파고-파장비(H/λ)는 $1/30 \sim 1/200$ 의 범위에서 실험이 진행되었다. 사실 모든 적용 파랑조건에서 파장-파고의 비를 같이 유지하는 것이 바람직하다. 그러나, 본 실험의 경우 짧은 파장에 대한 파장-파고의 비율을 유지하기에 어려움이 있어 파고를 고정하여 실험하는 방법을 택하였다.

선형수조의 크기는 모형선의 크기 및 실험 조건에 영향을 미친다. 특히 선형수조에서 운동실험을 저속에서 수행하는 경우 수조의 양쪽 벽이 실험에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 ITTC에서 제안하는 권고사항에 준하여 실험조건을 검토하였다. 예를 들어,

Fig. 4에서는 선수파의 경우 수조의 폭(B_T)이 운동실험에 미치는 영향을 나타내는 경계선을 보여준다. 이 그림에서 도시된 선의 위쪽에 위치하면 벽의 영향을 받지 않으며 선의 아래쪽에 위치하면 벽의 영향을 받는 영역이다. 이러한 한계조건을 고려하여 파랑의 주기, 즉 파장이 결정되어야 하는데, Fig. 4에서 점들로 표시된 것은 본 연구에서 적용한 모형선의 길이(L_M)와 수조의 폭에 대하여 본 실험조건에 적용한 파랑의 주파수(ω)를 의미한다. 따라서 Fig.4을 통해 본 실험에서 적용된 파랑 조건들이 적절하다는 것을 알 수 있다.

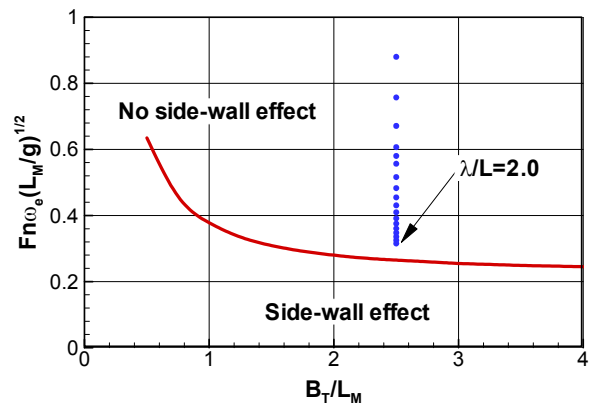


Fig. 4 Maximum frequency at which tank interface occurs in head waves (based on ITTC's procedure)

본 실험의 모든 파랑 조건에서 최소한 2번이상의 반복 실험을 진행하였으며, 불확실성 해석을 진행한 $\lambda/L=0.5, 1.1, 2.0$ 의 경우는 15번 이상의 반복실험을 진행하였다. 실험 조건 및 반복 횟수는 Table 2에 정리되어 있다. 반복실험으로 인해서 실험의 횟수가 많아 모든 실험을 연속적으로 할 수 없었으나 같은 조건의 반복실험은 최대한 연속적으로 수행하였다.

Table 2 Test conditions

Speed (Fn)	A/L	λ/L	H/λ	T(sec)	Repeated number
0.142	0.005	0.3	0.0333	0.784	4
		0.5	0.0200	1.012	16
		0.75	0.0133	1.240	4
		1.0	0.0100	1.432	5
		1.1	0.0091	1.502	15
		1.2	0.0083	1.568	4
		1.4	0.0071	1.694	2
		1.6	0.0063	1.811	2
		2.0	0.0050	2.025	18

3.5 측정장비 교정의 불확실성

측정장비는 Type B 불확실성을 가지고 있다. 이 불확실성은

장비의 사용설명서, 교정, 데이터의 수집과 처리를 통해서 평가할 수 있다. 본 실험에서는 ITTC 절차에 준하여 장비의 교정, 데이터의 수집과 처리에 대해서 불확실성을 고려하였다.

장비를 교정하는 경우 교정의 도구가 필요하다. 그런데, 교정 도구가 표준연구기관의 측정기를 사용하지 않기 때문에 교정 도구가 가지는 불확실성이 존재한다. 이 값을 B_{CS} 라하며, 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$B_{CS} = \sqrt{\sum(A_{CG} \cdot W_i)^2} \quad (5)$$

여기에서 A_{CG} 는 계측 장비의 정확도, W_i 는 교정에 사용된 교정 장비의 물리적 값이다.

교정 과정에서 장비의 조정 불량(misalignment)으로 인해서 불확실성이 발생하게 되는데, 이 값을 B_{CM} 로 나타내며 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$B_{CM} = \sum W(1 - \cos \alpha_i) \quad (6)$$

여기에서 W 는 공칭값(nominal value), α 는 조정 불량 각도이다.

교정의 결과를 이용하기 위해서는 곡선적합(curve fitting)을 이용하며, 곡선의 적합도로부터 교정의 불확실성을 평가할 수 있다. 곡선이 직선인 경우 아래의 식을 이용하여 교정의 직선적합 적합도를 평가한다.

$$SEE = \frac{1}{N-2} \left[\sum_{k=1}^N (y_k - y_{LS,k})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

여기에서 $y_{LS,k} = a + bx_k$ 는 독립변수의 어떤 값에 해당하는 회귀에 의한 값이다. 회귀식의 계수는 아래의 식으로부터 구할 수 있다.

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, \quad b = \frac{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2} \quad (8)$$

이때 \bar{x} , \bar{y} 는 측정 값의 평균이다.

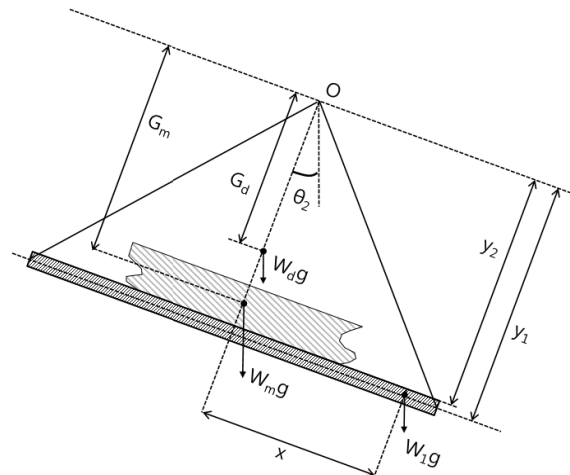
교정의 불확실성 및 데이터처리의 불확실성을 통해서 실험에 사용한 측정장비의 Type B 불확실성을 평가하였으며 Table 3에 그 결과를 정리하였다.

Table 3 Estimate of uncertainty for measurement devices

Instrument	Type B
Load cell(N)	3.063E-02
Heave potentiometer(m)	1.947E-04
Pitch potentiometer(rad)	4.667E-04
Sonar wave probe(m)	2.443E-04
Capacitance wave probe(m)	3.861E-04

3.6 모형선 중량 분포의 불확실성

모형선의 운동실험에서 모형선의 무게 중심과 종관성 반경은 모형선의 운동에 영향을 미친다. 본 연구에서 무게 중심과 종관성 반경의 측정 및 오차요소의 추정은 Yum, et al. (1993)을 참고하여 진행되었다. 본 연구에서 적용된 무게 중심과 종관성을 측정하기 위한 경사 테이블의 구성도와 실제 계측 사진을 Fig. 5에 나타내었다.



(a) Scheme and definitions for swing device



(b) Ship model in swing table

Fig. 5 View of swing device and model in swing table

여기에서 x 는 경사 테이블의 중심으로부터 시험 중량까지의 거리, y_1 는 경사 테이블의 회전 중심으로부터 시험 중량의 무게 중심까지의 거리, y_2 는 경사 테이블의 회전 중심으로부터 테이블 표면까지의 거리이다. W_t 는 시험 중량의 무게, W_s 는 경사 테이블의 무게, W_m 은 모형선의 무게이다. G_m 은 경사 테이블의 회전 중심으로부터 배의 무게 중심까지의 거리, G_d 는 경사 테이블의 회전 중심으로부터 경사 테이블의 무게 중심까지 거리이다. 더불

어, θ_1 은 경사 테이블에 모형선 없이 시험 중량만 올려 놓은 상태에서 경사각으로 정의하고, θ_2 는 경사 테이블에 모형선과 시험 중량을 놓은 상태에서 경사각이라고 정의하자.

경사 테이블 위에 놓인 모형선 무게 중심은 다음과 같이 표현된다.

$$KG = y_2 - G_m = y_2 - \frac{W_1 x}{W_m} (\cot\theta_2 - \cot\theta_1) \quad (9)$$

이를 적용하여 무게중심의 불확실성 추정을 위한 결합 불확실성은 다음과 같은 식으로부터 얻을 수 있다.

$$u_c^2(KG) = u(y_2)^2 \left(\frac{\partial KG}{\partial y_2}\right)^2 + u(W_m)^2 \left(\frac{\partial KG}{\partial W_m}\right)^2 + u(W_1)^2 \left(\frac{\partial KG}{\partial W_1}\right)^2 + u(x)^2 \left(\frac{\partial KG}{\partial x}\right)^2 + u(\theta_1)^2 \left(\frac{\partial KG}{\partial \theta_1}\right)^2 + u(\theta_2)^2 \left(\frac{\partial KG}{\partial \theta_2}\right)^2 \quad (10)$$

중관성 반경을 계측하기 위해서는 경사 테이블의 무게 중심을 알아야 하는데, 경사 테이블의 무게 중심은 다음과 같이 표현된다.

$$G_d = \frac{W_1}{W_d} (x \cot\theta_1 - y_1) \quad (11)$$

그런데, 경사 테이블의 무게중심의 추정에도 불확실성이 존재하므로 이를 실험의 불확실성에 포함하여야 한다. 경사 테이블의 무게중심 불확실성 추정을 위한 결합 불확실성은 다음과 같은 식으로부터 얻을 수 있다.

$$u_c^2(G_d) = u(W_1)^2 \left(\frac{\partial G_d}{\partial W_1}\right)^2 + u(W_d)^2 \left(\frac{\partial G_d}{\partial W_d}\right)^2 + u(x)^2 \left(\frac{\partial G_d}{\partial x}\right)^2 + u(\theta_1)^2 \left(\frac{\partial G_d}{\partial \theta_1}\right)^2 + u(y_1)^2 \left(\frac{\partial G_d}{\partial y_1}\right)^2 \quad (12)$$

모형선의 중관성 반경은 다음과 같은 식으로 얻을 수 있다.

$$k_{yy} = \sqrt{g \left(\frac{T_t}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{W_d}{W_m} G_d + G_m\right) - G_m^2 - g \left(\frac{T_d}{2\pi}\right)^2 \frac{W_d}{W_m} G_d} \quad (13)$$

이때, T_t 는 모형선을 올린 상태에서의 동요주기이고, T_d 는 경사테이블 자체의 동요주기를 의미한다. 위의 식을 적용하면 중관성의 불확실성 추정을 위한 결합 불확실성은 다음과 같은 식으로부터 얻을 수 있다.

$$u_c^2(k_{yy}) = u(T_t)^2 \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial T_t}\right)^2 + u(W_d)^2 \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial W_d}\right)^2 + u(W_m)^2 \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial W_m}\right)^2 + u(G_d)^2 \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial G_d}\right)^2 + u(G_m)^2 \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial G_m}\right)^2 + u(T_d)^2 \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial T_d}\right)^2 \quad (14)$$

본 연구를 통해 경사 테이블로부터 측정된 무게중심과 중관성 반경을 Table 4에 정리하였으며, 무게중심과 중관성 반경의 불확실성 해석의 결과는 Table 5~7에 정리하였다.

Table 4 Error of model setup for KG and k_{yy}

Item	Target	Result	Error(%)
KG(m)	1.860E-01	1.850E-01	-0.53%
k_{yy} (m)	8.000E-01	8.033E-01	0.42%

모형선의 무게중심과 중관성 반경의 불확실성 해석 결과를 살펴보면, 95% 신뢰도에서 무게중심은 8.86%, 중관성 반경은 1.82%의 불확실성 구간을 가지는 것을 확인할 수 있다. 무게중심의 불확실성은 큰 값을 가지는데 이 불확실성의 약 95%는 θ_2 의 불확실성에서 기인한다. θ_2 는 경사 테이블에 모형선과 시험 중량을 놓은 상태에서 경사각으로 2deg 이하의 아주 작은 값으로 이 값의 작은 불확실성이 모형선의 무게중심에 큰 영향을 미친다. 모형선의 무게중심을 측정할 때 θ_2 의 측정에 주의를 기울여야 하는 것을 알 수 있다.

Table 5 Estimate of uncertainty for KG

Source of uncertainty	Nominal Value	Type A uncertainty	Type B uncertainty	Standard uncertainty(u)	Sensitivity coefficient(θ)	($u\theta/u_c$) ² (%)
y_2 (m)	1.950E+00		1.000E-03	1.000E-03	1.000E+00	1.49%
W_m (kg)	3.120E+02		1.000E-01	1.000E-01	5.657E-03 m/kg	0.48%
W_1 (kg)	1.000E+01		2.000E-03	2.000E-03	1.765E-01 m/kg	0.19%
x(m)	1.475E+00		1.000E-03	1.000E-03	1.197E+00	2.13%
θ_1 (rad)	9.792E-02	4.585E-05	7.937E-05	9.166E-05	4.947E+00 m/rad	0.31%
θ_2 (rad)	2.104E-02	5.207E-05	5.391E-05	7.495E-05	1.068E+02 m/rad	95.41%
Combined uncertainty (u_c)			8.193E-03			
Expanded uncertainty (U)			1.639E-02	Y	1.850E-01 U/Y(%)	8.86%

Table 6 Estimate of uncertainty for G_d

Source of uncertainty	Nominal Value	Type A uncertainty	Type B uncertainty	Standard uncertainty(u)	Sensitivity coefficient(θ)	$(u\theta/u_c)^2(\%)$
$W_1(m)$	1.000E+01		2.000E-03	2.000E-03	1.774E-01 m/kg	1.16%
$W_d(kg)$	7.370E+01		1.000E-01	1.000E-01	2.407E-02 m/kg	53.29%
$x(m)$	1.475E+00		1.000E-03	1.000E-03	1.118E+00	11.49%
$\theta_1(rad)$	2.104E-02	4.858E-05	7.937E-05	9.166E-05	2.094E+01 m/rad	33.89%
$y_1(m)$	1.943E+00		1.000E-03	1.000E-03	1.357E-01	0.17%
Combined uncertainty (u_c)			3.297E-03			
Expanded uncertainty (U)			6.594E-03	Y	1.774E+00 U/Y(%)	0.37%

Table 7 Estimate of uncertainty for k_{yy}

Source of uncertainty	Nominal Value	Type A uncertainty	Type B uncertainty	Standard uncertainty(u)	Sensitivity coefficient(θ)	$(u\theta/u_c)^2(\%)$
$T_i(sec)$	2.956E+00	1.293E-04	1.000E-03	1.008E-03	1.997E+00 m/sec	7.66%
$W_d(kg)$	7.370E+01		1.000E-01	1.000E-01	6.143E-04 m/kg	0.01%
$W_m(kg)$	3.120E+02		1.000E-01	1.000E-01	1.451E-04 m/kg	0.00%
$G_d(m)$	1.774E+00	9.600E-04	3.151E-03	3.294E-03	2.553E-02	0.01%
$G_m(m)$	1.765E+00	5.564E-03	6.096E-03	8.254E-03	8.453E-01	91.98%
$T_d(sec)$	3.073E+00	3.457E-04	1.000E-03	1.058E-03	3.982E-01 m/sec	0.34%
Combined uncertainty (u_c)			7.274E-03			
Expanded uncertainty (U)			1.455E-02	Y	8.000E-01 U/Y(%)	1.82%

3.7 실험결과의 해석 방법

실험으로부터 얻은 파고는 계측 데이터의 제공된 평균을 이용하여 구하였는데, 파의 진폭은 다음과 같은 식으로 해석하였다.

$$\zeta_A = \frac{\sqrt{2}}{2} RMS \quad (15)$$

여기에서 RMS는 계측 데이터의 제공된 평균이다.

운동 및 부가저항은 계측된 신호를 푸리에 변환(fourier transform)하여 해석하였다. 푸리에 변환을 적용하는 경우, 실험 데이터의 해석값은 해석에 사용한 데이터의 시간범위(time window)에 따라서 값이 변할 수 있다. 따라서 해석에 사용한 데이터의 시간을 늘려가면서 부가저항의 해석값이 수렴하는지 우선 살펴보았다. Fig. 6은 3가지 파장에서 해석값의 수렴 여부를 살펴본 결과를 보여주고 있다. 이로 부터 본 연구의 해석에 사용한 데이터가 12주기 이상일 경우 수렴된 결과를 주는 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 실험결과를 분석하고 해석하는 방법에 따라 실험 결과값의 차이가 발생할 수 있다. 이러한 해석 방법에 의해서 발생하는 실험결과의 불확실성은 Type B 불확실성으로 볼 수 있으며 본 연구에서는 이러한 해석기법의 차이에 따른 불확실성도 해석에 반영하였다.

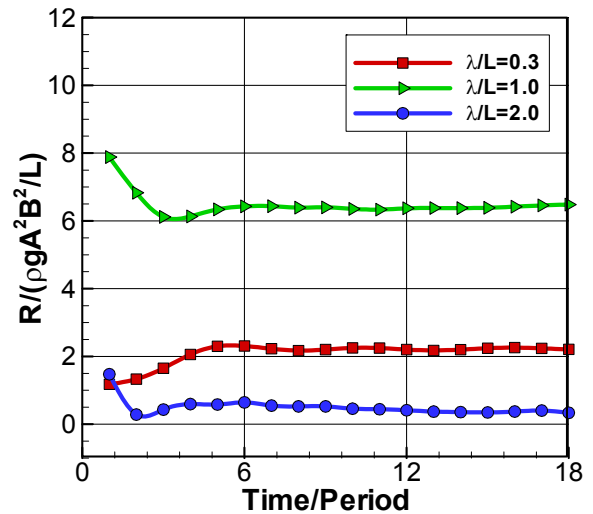


Fig. 6 Convergence test of data analysis

4. 모형시험 결과

4.1 규칙파의 불확실성 해석

부가저항 실험에서 규칙파를 정확하게 생성하는 것은 부가저항값에 중요한 요소이다. 규칙파는 플런저(plunger) 방식의 조파기에서 생성되었으며, 조파기로부터 11m 떨어진 지점에 설치된 음향파고계(sonar wave probe)에서 계측된 값을 이용하였다. 계

측된 파고는 식 (16)과 같이 무차원화 되었으며, 파장은 식(17)와 같이 무차원화 되었다. 파장은 직접 측정하지 않고 분산 관계 (dispersion relation)을 이용하여 파의 주기로부터 추정하였다. 파와 파장의 불확실성 추정을 위한 결합 불확실성은 식(18), (19)로부터 얻을 수 있다.

$$\lambda' = \frac{\lambda}{L} = \frac{2\pi g}{\omega^2 L} \quad (17)$$

$$u_c^2(A') = u(A)^2 \left(\frac{\partial A'}{\partial A} \right)^2 \quad (18)$$

$$A' = \frac{A}{A_I} \quad (16) \quad u_c^2(\lambda') = u(g)^2 \left(\frac{\partial \lambda'}{\partial g} \right)^2 + u(\omega)^2 \left(\frac{\partial \lambda'}{\partial \omega} \right)^2 + u(L)^2 \left(\frac{\partial \lambda'}{\partial L} \right)^2 \quad (19)$$

Table 8 Estimate of uncertainty for wave amplitude

Source of uncertainty	Nominal Value	Type A uncertainty	Type B uncertainty	Standard uncertainty(u)	Sensitivity coefficient(θ)		(uθ/u _c) ² (%)
$\lambda/L=0.5$							
A(m)	1.600E-02	4.683E-05	2.692E-04	2.732E-04	6.250E+01	/m	100.00%
Combined uncertainty (u _c)			1.708E-02				
Expanded uncertainty (U)			3.415E-02	Y	1.000E+00	U/Y(%)	3.42%
$\lambda/L=1.1$							
A(m)	1.600E-02	4.910E-05	2.709E-04	2.753E-04	6.250E+01	/m	100.00%
Combined uncertainty (u _c)			1.721E-02				
Expanded uncertainty (U)			3.441E-02	Y	1.000E+00	U/Y(%)	3.44%
$\lambda/L=2.0$							
A(m)	1.600E-02	3.813E-05	2.693E-04	2.719E-04	6.250E+01	/m	100.00%
Combined uncertainty (u _c)			1.700E-02				
Expanded uncertainty (U)			3.399E-02	Y	1.000E+00	U/Y(%)	3.40%

Table 9 Estimate of uncertainty for wave length

Source of uncertainty	Nominal Value	Type A uncertainty	Type B uncertainty	Standard uncertainty(u)	Sensitivity coefficient(θ)		(uθ/u _c) ² (%)
$\lambda/L=0.5$							
g(m/s ²)	9.799E+00		5.000E-03	5.000E-03	5.097E-02	s ² /m	0.26%
ω (rad/sec)	6.207E+00	1.062E-03	3.066E-02	3.068E-02	1.611E-01	sec/rad	99.48%
L(m)	3.200E+00		1.600E-03	1.600E-03	1.563E-01	/m	0.25%
Combined uncertainty (u _c)			4.955E-03				
Expanded uncertainty (U)			9.910E-03	Y	5.000E-01	U/Y(%)	1.98%
$\lambda/L=1.1$							
g(m/s ²)	9.799E+00		5.000E-03	5.000E-03	1.121E-01	s ² /m	0.58%
ω (rad/sec)	4.185E+00	5.901E-04	1.393E-02	1.395E-02	5.527E-01	sec/rad	98.87%
L(m)	3.200E+00		1.600E-03	1.600E-03	3.438E-01	/m	0.56%
Combined uncertainty (u _c)			7.375E-03				
Expanded uncertainty (U)			1.475E-02	Y	1.100E+00	U/Y(%)	1.34%
$\lambda/L=2.0$							
g(m/s ²)	9.799E+00		5.000E-03	5.000E-03	2.039E-01	s ² /m	1.04%
ω (rad/sec)	3.103E+00	3.488E-04	7.672E-03	7.672E-03	1.289E+00	sec/rad	97.96%
L(m)	3.200E+00		1.600E-03	1.600E-03	6.250E-01	/m	1.00%
Combined uncertainty (u _c)			9.991E-03				
Expanded uncertainty (U)			1.998E-02	Y	2.000E+00	U/Y(%)	1.00%

파의 진폭과 파장의 불확실성 해석은 Table 8, 9에 각각 정리되어 있다. 여기서 중력가속도의 불확실성은 한국표준과학연구원(KRIS)에서 제공하는 중력가속도 중에서 실험시설의 위치와 가장 가까운 지점의 중력가속도를 사용하였다. 파의 진폭은 3가지 조건에 대해서 $\pm 3.5\%$ 에 해당하는 95%의 신뢰구간이 형성되고, 파장은 $\pm 2\%$ 에 해당하는 95%의 신뢰구간이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 파의 진폭은 $\lambda/L=1.1$ 인 경우 약 5%정도 크게 생성되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 서울대학교 수조에 설치된 조파기의 교정 정확도와 관련된 것으로 생각된다. Fig. 7은 파의 무차원화된 진폭 및 파장의 95% 신뢰구간을 보여준다.

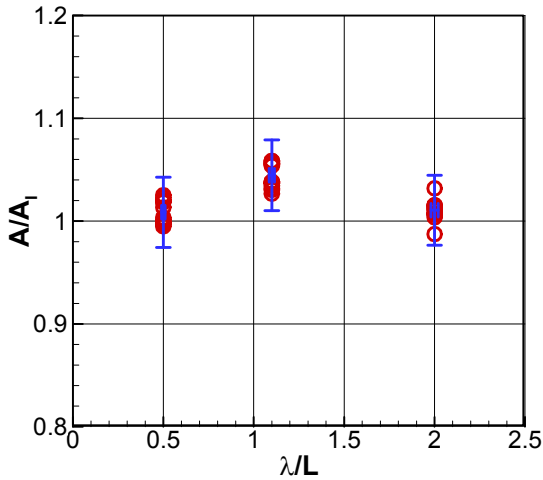


Fig. 7 Wave amplitude with 95% confidence bands

4.2 운동 응답의 불확실성 해석

계측된 상하동요 및 종동요 운동에 대하여 불확실성 해석을 수행하였으며, 실험결과의 검증에 위하여 동일모형에 대한 타 기관의 실험 결과 및 수치해석기법을 적용한 계산 결과를 본 실험에서 계측된 결과와 비교하였다. 상하동요 및 종동요 운동은 식 (20)~(21)과 같이 무차원화 하였으며, 불확실성 추정을 위한 결합 불확실성은 식(22), (23)로부터 얻을 수 있다.

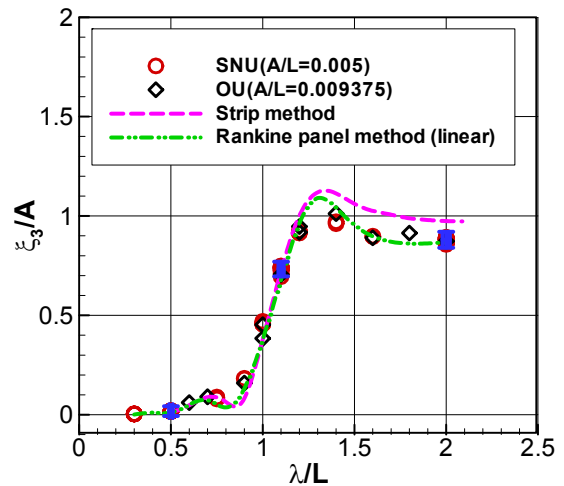
$$\xi_3' = \frac{\xi_3}{A} \quad (20)$$

$$\xi_5' = \frac{\xi_5}{kA} \quad (21)$$

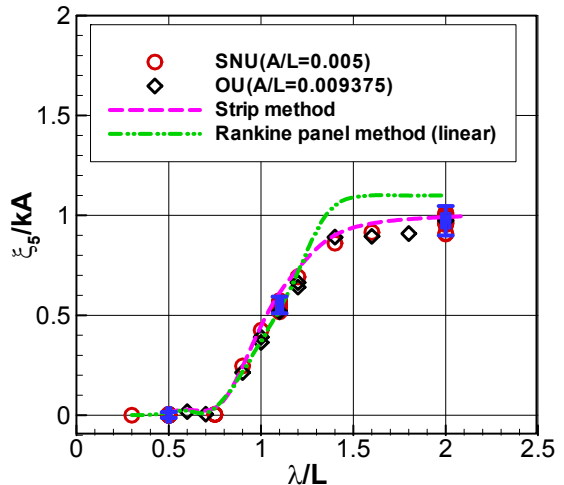
$$u_c^2(\xi_3') = u(\xi_3)^2 \left(\frac{\partial \xi_3'}{\partial \xi_3} \right)^2 + u(A)^2 \left(\frac{\partial \xi_3'}{\partial A} \right)^2 \quad (22)$$

$$u_c^2(\xi_5') = u(\xi_5)^2 \left(\frac{\partial \xi_5'}{\partial \xi_5} \right)^2 + u(k)^2 \left(\frac{\partial \xi_5'}{\partial k} \right)^2 + u(A)^2 \left(\frac{\partial \xi_5'}{\partial A} \right)^2 \quad (23)$$

Fig. 8에서는 상하동요 및 종동요 운동응답의 계측 결과를 동일한 선형에 대한 오사카 대학(OU)의 실험결과 (Larsson, et al. 2010), 그리고 두가지 기법을 적용한 수치해석의 결과들과 비교하고 있다. 특히 수치계산에는 스트립(strip) 방법과 랭킨패널법(rankine panel method)이 적용되었다 (Seo, et al., 2013). 오사카 대학에서의 실험 결과는 상하동요 및 종동요 운동응답 모두에서 본 연구의 실험 결과와 좋은 일치를 보여주고 있다. 수치계산 결과에 있어서는 스트립 방법을 적용하여 계산된 상하동요 운동응답의 경우 파장이 긴 경우에서 95%의 신뢰구간을 벗어났지만 전반적으로는 실험과 비슷한 경향을 보여주었다. 또한, 종동요 운동응답은 스트립 방법의 계산결과가 전체 주파수구간에서 좋은 결과를 보여주었다. 랭킨패널법의 경우, 전구간에서 실험결과와 유사한 결과를 보여주었다. 다만, 장파장(long wavelength) 부근에서 실험결과보다 약간 큰 결과를 보여주었다.



(a) Heave motion



(b) Pitch motion

Fig. 8 Motion RAOs with 95% confidence bands

불확실성 해석의 결과는 Table 10과 11에 정리하였다. $\lambda/L=0.5$ 의 경우 $\pm 100\%$ 가 넘는 구간의 불확실성을 보여주었으나 Fig. 8에서 보면 불확실성의 구간의 절대적인 크기는 작은 것을 확인할 수 있다. 이것은 오차를 구할 때 사용되는 운동 응답의 결

과값이 아주 작은 값이기 때문에 발생하는 것으로 $\pm 100\%$ 가 넘는 불확실성이 큰 의미는 없다. $\lambda/L=1.1, 2.0$ 의 경우 상하동요 응답은 약 5%, 종동요 응답은 약 7.5%에 해당하는 95% 신뢰구

간을 형성하였다. 무차원화된 상하동요의 불확실성은 상하동요와 파의 진폭의 불확실성이 비슷한 부분을 차지하고, 무차원화된 종동요의 불확실성은 대부분 종동요 예측의 불확실성이 차지한다.

Table 10 Estimate of uncertainty for heave motion

Source of uncertainty	Nominal Value	Type A uncertainty	Type B uncertainty	Standard uncertainty(u)	Sensitivity coefficient(θ)	$(u\theta/u_c)^2(\%)$
$\lambda/L=0.5$						
ξ_3 (m)	2.892E-04	4.033E-06	1.947E-04	1.947E-04	6.250E+01 /m	9.94%
A(m)	1.600E-02	4.683E-05	2.692E-04	2.692E-04	1.130E+00 /m	0.06%
Combined uncertainty (u_c)		1.218E-02				
Expanded uncertainty (U)		2.436E-02	Y	1.786E-02	U/Y(%)	136.40%
$\lambda/L=1.1$						
ξ_3 (m)	1.225E-02	5.029E-05	2.041E-04	2.102E-04	6.250E+01 /m	50.19%
A(m)	1.600E-02	4.910E-05	2.692E-04	2.736E-04	4.785E+01 /m	49.81%
Combined uncertainty (u_c)		1.855E-02				
Expanded uncertainty (U)		3.710E-02	Y	7.300E-01	U/Y(%)	5.06%
$\lambda/L=2.0$						
ξ_3 (m)	1.422E-02	4.828E-05	2.073E-04	2.129E-04	6.250E+01 /m	43.71%
A(m)	1.600E-02	3.813E-05	2.692E-04	2.718E-04	5.553E+01 /m	56.29%
Combined uncertainty (u_c)		2.012E-02				
Expanded uncertainty (U)		4.024E-02	Y	8.799E-01	U/Y(%)	4.57%

Table 11 Estimate of uncertainty for pitch motion

Source of uncertainty	Nominal Value	Type A uncertainty	Type B uncertainty	Standard uncertainty(u)	Sensitivity coefficient(θ)	$(u\theta/u_c)^2(\%)$
$\lambda/L=0.5$						
ξ_3 (rad)	7.474E-05	2.129E-05	4.667E-04	4.672E-04	1.592E+01 /rad	100.00%
A(m)	1.600E-02	3.813E-05	2.692E-04	2.718E-04	7.435E-02 /m	0.00%
k(rad/m)	3.927E+00	1.344E-03	3.879E-02	3.882E-02	3.029E-04 m/rad	0.00%
Combined uncertainty (u_c)		7.435E-03				
Expanded uncertainty (U)		1.487E-02	Y	1.178E-03	U/Y(%)	1262.55%
$\lambda/L=1.1$						
ξ_3 (rad)	1.647E-02	1.272E-04	4.949E-04	5.100E-04	3.501E+01 /rad	74.04%
A(m)	1.600E-02	4.910E-05	2.692E-04	2.736E-04	3.604E+01 /m	22.51%
k(rad/m)	1.785E+00	5.034E-04	1.189E-02	1.190E-02	3.321E-01	3.41%
Combined uncertainty (u_c)		2.079E-02				
Expanded uncertainty (U)		4.158E-02	Y	5.521E-01	U/Y(%)	7.53%
$\lambda/L=2.0$						
ξ_3 (rad)	1.544E-02	1.317E-04	4.916E-04	5.089E-04	6.366E+01 /rad	77.62%
A(m)	1.600E-02	3.813E-05	2.692E-04	2.718E-04	6.144E+01 /m	20.63%
k(rad/m)	9.817E-01	2.207E-04	4.849E-03	4.854E-03	1.001E+00 m/rad	1.75%
Combined uncertainty (u_c)		3.677E-02				
Expanded uncertainty (U)		7.355E-02	Y	9.735E-01	U/Y(%)	7.56%

5. 부가저항 계측의 불확실성

위의 결과 및 계측된 실험결과로부터 부가저항에 대한 불확실성 해석을 수행하였으며, 이에 대한 검증을 위하여 참고문헌의 실험결과 및 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 부가저항의 무차원화는 식(24)와 같이 하였으며, 부가저항의 불확실성 추정을 위한 결합 불확실성은 식(25)과 같다.

$$R_A = \frac{R - R_0}{\rho g A^2 B^2 / L} \tag{24}$$

$$u_c^2(R_A) = u(R)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial R} \right)^2 + u(R_0)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial R_0} \right)^2 + u(\rho)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial \rho} \right)^2 + u(g)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial g} \right)^2 + u(A)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial A} \right)^2 + u(B)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial B} \right)^2 + u(L)^2 \left(\frac{\partial R_A}{\partial L} \right)^2 \tag{25}$$

Table 12 Estimate of uncertainty for added resistance

Source of uncertainty	Nominal Value	Type A uncertainty	Type B uncertainty	Standard uncertainty(u)	Sensitivity coefficient(θ)	(uθ/u _c) ² (%)
$\lambda/L=0.5$						
ρ (kg/m ³)	9.978E+02		4.837E-02	4.837E-02	3.014E-03 m ³ /kg	0.00%
g(m/s ²)	9.799E+00		5.000E-03	5.000E-03	3.069E+02 s ² /m	0.00%
A(m)	1.600E-02	4.683E-05	2.692E-04	2.732E-04	3.760E+02 s ² /m	19.58%
B(m)	5.800E-01		1.000E-03	1.000E-03	1.037E+01 /m	0.20%
L(m)	3.200E+00		1.600E-03	1.600E-03	9.399E-01 /m	0.00%
R ₀ (N)	3.966E+00	4.251E-03	3.649E-02	3.674E-02	3.800E+00 /N	36.17%
R(N)	4.758E+00	1.182E-02	3.878E-02	43.054E-02	3.800E+00 /N	44.05%
Combined uncertainty (u _c)				2.323E-01		
Expanded uncertainty (U)			4.643E-01	Y	2.932E+00 U/Y(%)	15.83%
$\lambda/L=1.1$						
ρ (kg/m ³)	9.978E+02		4.837E-02	4.837E-02	7.867E-03 m ³ /kg	0.00%
g(m/s ²)	9.799E+00		5.000E-03	5.000E-03	8.011E-01 s ² /m	0.01%
A(m)	1.600E-02	4.910E-05	2.709E-04	2.763E-04	9.812E+02 s ² /m	58.36%
B(m)	5.800E-01		1.000E-03	1.000E-03	2.707E+01 /m	0.59%
L(m)	3.200E+00		1.600E-03	1.600E-03	2.453E+00 /m	0.01%
R ₀ (N)	3.966E+00	4.251E-03	3.649E-02	3.674E-02	3.800E+00 /N	15.59%
R(N)	6.032E+00	1.881E-02	4.299E-02	4.692E-02	3.800E+00 /N	25.43%
Combined uncertainty (u _c)				3.536E-01		
Expanded uncertainty (U)			7.072E-01	Y	7.195E+00 U/Y(%)	9.83%
$\lambda/L=2.0$						
ρ (kg/m ³)	9.978E+02		4.837E-02	4.837E-02	8.296E-04 m ³ /kg	0.00%
g(m/s ²)	9.799E+00		5.000E-03	5.000E-03	8.447E-02 s ² /m	0.00%
A(m)	1.600E-02	3.813E-05	2.693E-04	2.719E-04	1.035E+02 s ² /m	1.31%
B(m)	5.800E-01		1.000E-03	1.000E-03	2.854E+00 /m	0.01%
L(m)	3.200E+00		1.600E-03	1.600E-03	2.587E-01 /m	0.00%
R ₀ (N)	3.966E+00	4.251E-03	3.649E-02	3.674E-02	3.800E+00 /N	32.19%
R(N)	4.184E+00	9.937E-03	5.185E-02	5.280E-02	3.800E+00 /N	66.49%
Combined uncertainty (u _c)				2.461E-01		
Expanded uncertainty (U)			4.922E-01	Y	8.099E-01 U/Y(%)	60.76%

불확실성 해석의 결과는 Table 12에 자세히 정리되었다. 이 결과를 살펴보면, $\lambda/L=0.5$ 의 경우 부가저항이 $\pm 15.83\%$ 에 해당하는 95%의 신뢰구간을 보여주었다. 이러한 불확실성의 큰 부분은 저항의 계측, 즉 로드셀(load cell)에서 유발되었으며, 이로부터 실험의 불확실성을 줄이기 위해서는 로드셀(load cell)의 불확실성 개선이 필요하다는 것을 알 수 있었다. $\lambda/L=1.1$ 의 경우에는 부가저항의 $\pm 9.83\%$ 에 해당하는 95%의 신뢰구간을 보여주었다. 이 조건에서는 로드셀의 불확실성과 더불어 파고의 불확실성이 큰 부분을 차지하였다. Table 12을 살펴보면, 파고에 대한 민감도계수 (sensitivity coefficient)가 다른 요소의 민감도계수보다 아주 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 $\lambda/L=1.1$ 의 경우 파고 불확실성이 실험결과에 큰 영향을 미칠 수 있다. $\lambda/L=2.0$ 의 조건에서는 부가저항의 $\pm 60.76\%$ 에 해당하는 95%의 신뢰구간을 보여주었으며, 각 요소의 불확실성은 $\lambda/L=0.5$ 와 비슷한 경향을 보여주었다. 그러나, 부가저항의 실험결과는 운동응답의 결과와 비교해 실험결과가 넓게 분산되어 있으며, 불확실성도 크게 추정되었다. 이 조건에서 부가저항의 불확실성이 대단히 큰 값을 보인 것은, 부가저항의 값이 워낙 작아, 작은 오차라 할지라도 큰 불확실성을 유기하기 때문이다.

본 연구에서 얻어진 계측치들의 검증을 위해 Fig. 9에서 오사카 대학(OU)의 실험 및 NTNU (Bingjie & Steen, 2010)의 실험결과와 본 연구에서 계측된 부가저항 값들을 비교하였다. 그리고, 세가지 방법을 적용한 수치해석의 결과와도 비교하고 있다. 실험의 결과들이 모두 비슷한 값들과 변화의 경향을 보여주고 있음은 분명하고, 불확실성 해석이 수행된 세 주파수의 파랑조건에서 모든 실험결과들이 95%의 신뢰구간에 들어있는 것을 볼 수 있다.

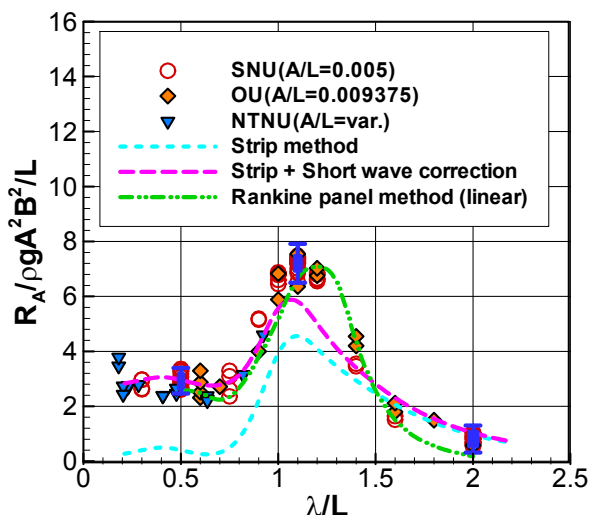


Fig. 9 Added resistance with 95% confidence bands

Fig. 9에서 주목할만한 것은, 랭킨패널법을 적용하여 계산된 부가저항 값들은 불확실성 해석을 통해 예측된 95%의 신뢰구간에 모든 계산 결과값이 속하고 있는데 비해, 스트립 방법을 적용한 경우에는 기법은 단파장 영역을 보정하지 않은 경우 전 영역에서 실험 결과보다 작은 값을 보여준다. 본 연구에서 적용한 스트립 방법에서는 Maruo (1960)의 공식을 적용하여 부가저항을 구하였

다. 다만, 단파장 영역에서의 보정법을 적용한 경우에는 실험값들과 좋은 일치를 보이고 있어, 일반적인 스트립 방법만으로는 실질적 적용이 힘든 것을 알 수 있다. 이에 대한 자세한 연구결과에 대해서는 Seo, et al. (2013)의 자료를 참조하기 바란다.

내향성능이나 부가저항 계측의 불확실성 수준은 정수 중 저항 계측에서의 불확실성 정도에 비해 대단히 크다. 이는 내향성능 자체의 불확실성이 크기 때문인 것이 하나의 주요 원인이며, 부가저항 자체가 선형의 힘이 아닌 고차(high order)의 힘이기에 값 자체가 작은 이유에도 기인한다. 부가저항의 불확실성의 줄이는 방법은 운동 계측의 불확실성을 줄여야 하는 것이 중요하고, 이를 위해서는 모형선과 파랑의 실험측척을 증가하여야 한다. 본 연구에서는 1/100 축척의 모형선을 사용하였으나, 크기가 큰 모형선에 대한 실험에서는 불확실성이 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

6. 결론

KVLCC2 선형의 운동 및 부가저항 실험을 수행하였으며, 실험 결과의 불확실성 해석을 수행하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 불확실성 해석을 통해 상하동요 응답은 $\pm 5\%$, 종동요 응답은 $\pm 7.5\%$ 에 해당하는 95%의 신뢰구간을 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 부가저항은 파장비에 따라서 불확실성의 신뢰구간에 큰 차이를 보였다. 부가저항이 가장 큰 영역에서는 $\pm 10\%$ 에 해당하는 95%의 신뢰구간을 형성하였다.
- 불확실성 해석의 결과로부터 전체 불확실성에 기여하는 각 요소의 비율을 파악할 수 있었다. 기여 비율이 높은 부분의 불확실성의 개선하면 실험의 신뢰도를 높일 수 있을 것이다.
- 기존의 실험 결과 및 계산 결과는 대체로 95%의 신뢰구간에 존재하는 것을 알 수 있었다.
- 본 연구에서 수행한 불확실성 해석은 수식으로 주어진 요소의 불확실성만을 반영하였다. 그러나 수식으로 주어지지 않더라도 실험에 영향을 미치는 요소가 있으므로, 확장된 불확실성 해석이 필요하다.
- 본 연구에서 적용된 모형선의 축척비(1/100)보다 큰 모형선을 적용함으로써 부가저항 실험의 불확실성을 낮출 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 보다 정확한 부가저항 계측을 위하여 가급적 큰 축척의 모형선 실험이 권장된다.

후기

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

References

- American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 1995. *Assessment of Wind Tunnel Data Uncertainty, AIAA S-071-1995*, Washington D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Bingjie, G. & Steen, S., 2010. Added resistance of a VLCC in short waves. *29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, China, 6-11 June 2010, pp.609-617.
- Coleman, H.W. & Steele, W.G., 1995. Engineering Application of Experimental Uncertainty Analysis. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Journal*, 33(10), pp.1888-1896.
- Fujii, H. & Takahashi, T., 1975. Experimental study on the resistance increase of a ship in regular oblique waves. *Proceeding of the 14th ITTC*, Ottawa, September 1975, pp.351-360.
- Gerritsma, J. & Beukelman, W., 1972. Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship. *International Shipbuilding Progress*, 19(217), pp. 285-293.
- International Organization for Standardization (ISO), 1995. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements. *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland.
- International Towing Tank Conference (ITTC), 2011a, *Seakeeping Experiments (7.5-02-07-02.1), ITTC-Recommended Procedures and Guidelines*. International Towing Tank Conference.
- International Towing Tank Conference (ITTC), 2011b. *Prediction of Power Increase in Irregular Waves from Model Test (7.5-02-07-02.2). ITTC-Recommended Procedures*. International Towing Tank Conference.
- International Towing Tank Conference (ITTC), 2011c. *Ship Models (7.5-01-01-01), ITTC-Recommended Procedures and Guidelines*.
- Irvine, M. Longo, J. & Stern, F., 2008. Pitch and Heave Tests and Uncertainty Assessment for a Surface Combatant in Regular Head Waves. *Journal of Ship Research*, 52(2), pp.146-163.
- Journee, J.M.J., 1992. *Experiments and calculations on four Wigley hull forms. Delft University of Technology Report 0909-DUT-92*. Delft: Delft University.
- Kuroda, M. Tsujimoto, M. Sasaki, N. Ohmatsu, S. & Takagi, K., 2012. Study on the bow shapes above the waterline in view of the powering and greenhouse gas emissions in actual seas. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 226, pp.23-35.
- Larsson, L. Stern, F. & Visonneau, M., 2010. Gothenburg 2010, *A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics*, Gothenburg, Sweden, 8-10 December 2010.
- Lee, J.H. Seo, M.G. Park, D.M. Yang, K.K. Kim, K.H. & Kim, Y., 2013. Study on the effects of hull form on added resistance. *The 12th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Changwon, Korea, 20-25 October 2013, pp.329-337.
- Longo, J. & Stern, F., 2005. Uncertainty Assessment for Towing Tank Tests With Example for Surface Combatant DTMB Model 5415. *Journal of Ship Research*, 49(1), pp.55-68.
- Maruo, H. 1960. Wave resistance of a ship in regular head seas. *Bulletin of the Faculty of Engineering, Yokohama National University*, 9, pp.73-91.
- Moffat, R.J., 1988. Describing the Uncertainties in Experimental Results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1), pp.3-17.
- Nakamura, S. & Naito, S., 1977. Propulsive Performance of a Containership in Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 15, pp. 24-48.
- Nishio, S. Himeno, Y. & Takamatsu, K., 1991. Application of Measurement-Uncertainty Analysis to Resistance and Self Propulsion Tests of Ship Model. *Journal of Kansai Society of Naval Architects of Japan*, 216. pp.51-64.
- 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(15), pp.1-15.
- Storm-Tejsten, J. Yeh, H.Y.H. & Moran, D.D. ,1973. Added resistance in waves. *Trans SNAME*, 81, pp. 250-279.
- Yum, D.J. Lee, H.Y. & Lee, C.M., 1993. Uncertainty Analysis for Seakeeping Model Tests. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 30(3) pp. 75-89.



박동민

이재훈

김용환