

論 文

大韓造船學會論文集
제 30 卷 第 3 號 1993 年 8 月
Transactions of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 30, No. 3, August 1993

정현파 중 운동모형시험에 대한 불확실성 해석

염덕준*, 이호영*, 이정목**

Uncertainty Analysis for Seakeeping Model Tests

by

Deuk Joon Yum*, Ho Young Lee* and Choung Mook Lee**

요 약

본 논문은 기본적으로 미국 기계학회의 성능시험 코드에 준하여 운동 모형시험에 불확실성 해석을 적용하였다. 총 불확실성은 시험준비 과정, 계기의 검증, 데이터 취득 과정 및 분석과정에서 발생하는 오차요인들과 오차 전파 방정식에 의해 구하여진 민감도와 결합하여 구해진다. 저항추진 시험과 같은 정적시험과 운동시험과 같은 동적시험의 차이들이 불확실성 해석의 모든 과정동안 분명하게 구별되며 또한 비대칭 고정오차항목이 고려되었다. 본 불확실성 해석이 수행된 운동 응답 항목은 무차원화된 주파수의 함수로 나타낸 상하동요와 종동요의 RAO이다. 운동시험에 대한 불확실성 해석은 측정 정도를 향상시키고 오차들을 정량화하는데 유용할 뿐만아니라 여러가지 운동 해석 프로그램에 대한 검증의 기준으로 제시될 수 있다.

Abstract

The present paper describes an application of UA(Uncertainty Analysis) to seakeeping model test, basically according to the Performance Test Code of ASME(American Society of Mechanical Engineers), in which all the possible error sources involved in the preparation of test, calibration of instruments, data acquisition and analysis are quantified, and summed up with error propagation coefficients to the final uncertainties. The differences between the static test such as resistance and propulsion test and the dynamic test like seakeeping test are clearly identified during all the procedures of UA and asymmetric bias errors are considered. The DRE(data reduction equation) subject to present UA are the heave and pitch response amplitude operator and nondimensionalized absolute frequency.

발 표 : 1993년도 대한조선학회 춘계연구발표회('93. 4. 16.)

접수일자 : 1993년 3월 19일, 재접수일자 : 1993년 4월 26일

* 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

** 정회원, 포항공과대학 기계공학과

The usefulness of UA in seakeeping test were confirmed not only for quantifying errors and improving measurement accuracy but also for the validation of various seakeeping analysis tools.

1. 서 론

계측에 있어서 불확실성 해석(uncertainty analysis)의 목적은 계측시 나타나는 오차를 정량화하고 계측 결과의 신뢰성에 대한 객관적인 지표를 얻는 것이다. 또한 불확실성 해석을 통하여 구하여진 결과는 타 실험과의 비교 및 실험 방법의 개선 등을 통하여 실험의 정도를 향상시키는데 유효하게 사용될 수 있다.

ASME, AIAA(American Institute of Aeronautics and Astronautics)와 ANSI(American National Standards Institute)를 중심으로 하여 기계 분야와 우주항공 분야등 많은 공학분야에서는 이미 오래전부터 실험이나 해석의 오차와 신뢰성 문제가 주요 관심 연구 대상이 되어 왔다. 그러나 조선공학에서는 근래 들어 ITTC(국제예인수조협회)를 주축으로 조선공학에 있어서 수치해석과 실험에 있어서의 오차 해석의 필요성이 제기되었고 ANSI/ASME 성능시험 규약[1]를 기초로 한 불확실성 해석 방법이 저항시험등 몇가지 예에 대한 간단한 해석 결과와 함께 소개되었다[2]. Himeno et al[3]과 Nishio et al[4]은 ITTC에서 제시된 불확실성 해석의 일반적인 방법을 더욱 개선 발전시켜서 선박의 저항 추진시험에 대하여 적용하였다. Fogash[5]는 저항시험 수행시 총 저항, R_T ,와 모형선 속도, V_m 에 발생할 수 있는 오차 요인들에 대한 정밀 분석을 수행하였다.

선박의 내항성능에 대하여는 제 15, 16차 ITTC 내항성 분과에서 수행한 국제 공동연구에 대한 보고서 [6][7]에서 지적된 것처럼 여러 회원기관에서 수행된 해석 또는 실험 결과들이 심하게 분산되어 있음을 알 수 있으며 체계적인 오차 분석의 필요가 있음을 보여주고 있다. Hirayama et al[8]는 선박의 내항성능 수조 시험시 발생할 수 있는 여러 가지 오차요인들을 기술하였으나 불확실성 해석에 대한 체계적인 접근보다는 실험 결과들에 대한 조선공학적인 해석만을 수행하였다.

본 논문에서는 불확실성 해석을 규칙 선수과중 선체운동 모형 시험에 대하여 적용하였다. 분석 모델로서는 ITTC 표준 컨테이너 운반선(S-175)이 사용되

었으며 해석은 규칙 선수과중에서 중동요와 상하동요의 주파수 응답 함수에 대하여 수행되었다.

2. 불확실성 해석(Uncertainty Analysis)의 개요

계측에 있어서의 오차의 정의나 불확실성 해석의 방법에 대하여는 ANSI/ASME의 성능시험 규약 [1]과 Coleman과 Steele[9]에 자세히 기술되어 있다. 따라서 본 장에서는 자세한 설명은 생략하고 본론의 전개 과정에서 필요한 내용에 대하여 간략히 설명한다.

2.1 계측정도와 불확실성(Measurement Accuracy and Uncertainty)

모든 계측에는 제거할 수 있는 모든 오차의 요인을 제거하였다고 하여도 어느 정도의 오차는 존재하게 된다. 계측으로 구하여진 값과 실제적으로는 알 수 없지만 참값의 차이를 전체 계측 오차, δ_k 라 하면 δ_k 는 고정 오차(bias error), β 와 반복 오차(precision error), ϵ_k 의 2가지 성분의 합으로 표현된다.

$$\delta_k = \beta + \epsilon_k \quad (1)$$

고정 오차는 고정된 또는 체계적으로 존재하는 오차로서 동일한 계측 시스템으로 여러 번에 걸쳐서 계측을 수행하였을 때 항상 동일한 값으로 나타나는 오차요소이며 반복 오차는 random 또는 repeatability error로도 불리고 있으며 실험 결과가 분산되는 현상을 보여주는 오차 요소이다. 계측되는 변수 또는 현상의 불균일성이나 계측기기의 불안정성등에 의하여 발생하는 이러한 분산은 계측되는 data 수가 많아지면 정규분포(normal distribution)에 접근한다. Fig.1에 고정 오차와 반복 오차가 도식화 되어 표시되었다.

모든 계측에 필연적으로 수반되는 오차 요소들로 인하여 계측치의 참값은 알 수가 없다. 따라서 불확실성 해석은 계측시 존재하는 고정 오차와 반복 오차의 적정 한계를 측정하여 수치화 하고 어느 선택된 신뢰도에 대하여 참값이 그 안에 존재할 신뢰구간

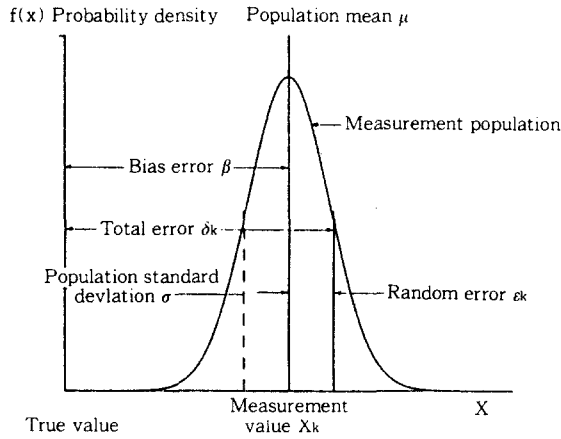


Fig. 1 Definition of errors

(confidence interval)을 구하는 것이다. 일반적으로 불확실성 해석에서는 95% 신뢰구간이 사용된다. 변수 X_i 의 overall uncertainty, U_{X_i} 는 다음식과 같이 고정 오차 한계, B_{X_i} 와 반복 오차 한계, P_{X_i} 의 root-sum-square(RSS)에 의하여 구하여진다.

$$U_{X_i} = \sqrt{B_{X_i}^2 + P_{X_i}^2} = \sqrt{B_{X_i}^2 + (tS_{X_i})^2} \quad (2)$$

여기서 정밀도 지표(precision index) S_{X_i} 는 변수 X_i 에 대한 계측이 여러번 반복되었을 때의 표준 편차를 나타내며 다음의 식으로 구하여진다.

$$S_{X_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^N \frac{(X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{N - 1}} \quad (3)$$

식 (2)의 t는 student t 값이며 식 (3)중 S_{X_i} 를 구하는 과정에서 자유도의 갯수, $\nu (= N - 1)$ 에 따라 정하여지는 상수이다. 여기서 \bar{X}_i 는 X_i 에 대한 N번의 계측치의 산술평균을 나타낸다. 계측의 대상이 X_i 값이 아니고 \bar{X}_i 인 경우 \bar{X}_i 에 대한 정밀도 지표 $S_{\bar{X}_i}$ 는 다음식과 같이 된다.

$$S_{\bar{X}_i} = \frac{S_{X_i}}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

반복 오차는 항상 참값을 중심으로 정규분포되어

있다고 가정되어 지고 있으나 고정 오차는 비대칭적으로 발생할 수 있으며 이 때에는 양의 요소와 음의 요소를 분리 취급하여 다음식과 같이 전체 오차 한계를 구하여야 한다.

$$U_{X_i}^{\pm} = \sqrt{B_{X_i}^{\pm 2} + P_{X_i}^2} \quad (5)$$

식 (2)와 (5)는 변수 X_i 의 계측치가 X_{exp} 일 때 고정 오차가 대칭일 때는 $[X_{exp} \pm U_{X_i}]$ 내에 고정 오차가 비대칭일 때는 $[X_{exp} - U_{X_i}^-, X_{exp} - U_{X_i}^+]$ 내에 X_i 의 참값이 존재할 확률이 95%인 것을 나타내는 식으로 해석된다.

2.2 오차의 전파 (Propagation of Uncertainty)

앞 절에서 하나의 가상 변수 X_i 에 대한 오차 한계와 신뢰구간에 대하여 설명하였다. 만약 실험이나 계측에 의하여 얻어지는 결과인 R이 다음과 같이 K개의 독립된 변수 $X_i (i = 1, K)$ 의 함수(data reduction equation(DRE))로 표시된다면,

$$R = R(X_1, X_2, \dots, X_K) \quad (6)$$

결과 R에 대한 고정 오차 한계, B_R 과 반복 오차 한계, P_R 은 RSS에 의하여 다음식과 같이 된다.

$$B_R^{\pm} = \sqrt{\sum_{i=1}^K (\theta_i B_{X_i}^{\pm})^2} \quad (7)$$

$$P_R = \sqrt{\sum_{i=1}^K (\theta_i P_{X_i})^2} \quad (8)$$

여기서 $\theta_i = \partial R / \partial X_i$ 이며 오차 전파계수(error propagation coefficient) 또는 민감도(sensitivity)라 불린다.

식 (7)과 (8)로 부터 R에 대한 고정 오차 및 반복 오차 한계를 RSS 방법으로 결합하면 overall uncertainty, U_R 이 구해진다.

$$U_R^{\pm} = \sqrt{B_R^{\pm 2} + P_R^2} \quad (9)$$

2.3 상호 의존적인 고정 오차한계(Nonindependent Bias Limits)

식 (7)에 나타난 오차 전파 과정은 각 변수 X_i ($i=1, K$)의 고정 오차가 상호 독립적인 경우에 적용될 수 있다. 그러나 어떤 변수들의 고정 오차가 상관관계(correlation)가 있다고 하면 다음과 같은 식이 사용되어야 한다[9].

$$B_{\mathbf{R}}^2 = \sum_{i=1}^K [\theta_i^2 B_{X_i}^2 + \sum_{j=1}^K \theta_i \theta_j \rho_{ij} B_{X_i} B_{X_j} (1 - \delta_{ij})]$$

(10)

여기서 Kronecker delta는

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

이고 변수 X_i 와 X_j 의 고정 오차에 대한 상관계수, ρ_{ij} 는 1과 -1 사이의 값이며 서로 독립적인 때는 0의 값을 갖고 교환성이 있다(즉, $\rho_{ij} = \rho_{ji}$).

3. 불확실성 해석의 정현파중 운동시험에의 적용

불확실성 해석은 크게 두가지 과정으로 나뉘어져 수행된다. 첫번째 과정에서는 시험의 준비, 측정 및 해석의 전과정에서 발생하는 모든 오차요소를 색출하여 정량화 하는 과정이며 두번째는 Data Reduction Equation(DRE)과 첫번째 과정에서 구한 오차요소를 결합하여 overall uncertainty와 95%의 신뢰도를 갖는 신뢰구간을 구하는 과정이다. Table 1에는 전 해석 과정에서 필요한 계측 및 해석 항목들을 나

Table 1 Objects of uncertainty analysis for motion test

Measurement	
L, B, d(m)	Model Dimension(LBP, Beam, Draft)
V(m/sec)	Carriage Speed
KG(m)	Distance from Keel to Center of Gravity
k_{yy} (m)	Pitch Radius of Gyration
ζ_a (m)	Wave Amplitude
ω_e (rad/sec)	Encounter Frequency
H(m)	Heave Amplitude
θ (deg)	Pitch Amplitude
Analysis	
λ (m)	Wave Length
$\omega' (= \omega \sqrt{L/g})$	Nondimensional Frequency
$H' (= H/\zeta_a)$	Heave RAO
$\theta' (= (\theta/\zeta_a)\lambda/360)$	Pitch RAO

타내었다.

불확실성 해석을 위한 운동시험은 현대선박해양연구소의 예인수조(L×B×D = 210m×14m×6m)에서 수행되었다. 대상선형은 ITTC의 내항성분과에서 선체 운동응답, 부가저항등의 계측을 위한 국제공동 연구를 위하여 사용한 콘테이너 운반선(S-175)을 택하였으며 주요 요목은 Table 2에 나타내었다. 실험에 사용한 모형선의 축적비는 1/38,889 이었고 빌지 및 타는 부착하지 않았으며 예인상태에서 실험을 행하였다. 모형선의 예인점은 선체 중심의 길이방향 위치(LCB)에 두었으며 계측항목은 파고, 상하동요 및 종동요이고 선수파중에서 $F_n = 0.275$ 인 경우에서 실험을 하였다. 자료 취득시간은 40초로 했으며 자료 취득은 초당 20개로 일정하게 하였다. Fig. 2에는 운동 모형 시험 절차가 간략하게 도식화되어 있으며 세부 시험방법은 참고문헌[10]을 기준하였다.

Table 2 Principal particulars of model ship

Model Ship	S-175
LBP(m)	4.50
B(m)	0.6531
D(m)	0.396
T(m)	0.2443
Displacement Volume(m ³)	0.4101
LCB(m)	0.0364
C_b	0.5716
GM(m)	0.0257
KM(m)	0.2705
k_{yy} /LBP	0.24
KG(m)	0.2448

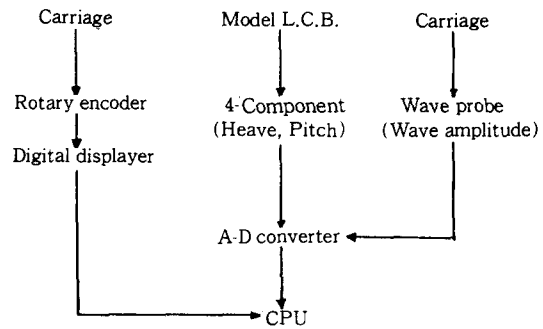


Fig. 2 Motion test procedure

3.1 오차 요소 분석

3.1.1 모형선의 정도와 흘수 조정에 관련된 오차

운동시험에 사용하는 모형선의 선체 요목에 대한 오차는 설계치로부터 제작시 가공 정도, 시간이 지남에 따른 모형의 변형, 흘수 조정의 정도등을 고려하여 추정할 수 있다. 본 연구에서는 Table 3에 표시되어 있는 것처럼 모형선의 정도 관련 오차 항목으로 수선간 길이(L)와 폭(B)이 고려되었으며 제작에 관련된 오차의 크기 정도가 고려되었다. 흘수 조정 관련 오차 항목으로는 흘수(d)가 고려되었으며 모형선의 배수량 오차에 따른 흘수의 오차가 추정되었다.

Table 3 Error sources for motion test(V=1.827m/ s)

Error Sources	Error	Sensitivity	Error Components		Uncertainty
			Bias Limit	Precision Index	
Model dimension					
1) LBP(4.50m)	1.00E-03m	1.00E+00	1.00E-03m		
2) B(0.6531m)	1.00E-03m	1.00E+00	1.00E-03m		
3) d(0.2443m)	2.97E-04m	1.00E+00	2.97E-04m		
Swinging table					
1) x(2m)	1.00E-03m	1.00E+00	1.00E-03m		
2) y1(1.950m)	1.00E-03m	1.00E+00	1.00E-03m		
3) y2(1.795m)	1.00E-03m	1.00E+00	1.00E-03m		
4) W1(20kg)	2.00E-03kg	1.00E+00	2.00E-03kg		
5) Wm(410kg)	5.00E-01kg	1.00E+00	5.00E-01kg		
6) Wd(169kg)	1.00E-01kg	1.00E+00	1.00E-01kg		
Timer					
1) Trigger error	1.00E-04sec /FS	1.41E+00	1.41E-04sec		
2) Digital error	1.00E-04sec	1.00E+00	1.00E-04sec		
3) Measurement	2.8E-04sec	1.00E+00	2.84E-04sec		
			1.73E-04sec	2.84E-04sec	6.51E-04sec
Accelerometer					
1) Linearity error	5.00E-03volt	1.00E-01rad/volt	5.00E-04rad		
Velocity(1.827m/s)					
1) Wheel diameter	2.00E-04m	1.15E+01 1/s	2.30E-03m/s		
2) Pulse frequency	1.45E-01pulse/sec	1.00E-04m/pulse	1.45E-05m/s		
3) Digital counter	15pulse/sec	1.00E-04m/pulse	1.50E-03m/s		
			2.30E-03m/sec	1.50E-03m/s	3.78E-03m/s
Wave-probe					
1) Calibration error	4.30E-05 /FS	1.50E-01m	6.45E-05m		
2) Dynamic error(B ²)	3.33E-03 /FS	1.50E-01m	5.00E-04m		
4-Component					
1) Heave	2.16E-03 /FS	3.00E-01m	6.48E-04m		
2) Pitch	2.28E-03 /FS	3.00E+01deg	6.84E-02deg		
A-D Converter					
1) Ch. 1(wave)	1.17E-04 /FS	1.50E-01m	1.76E-05m		
2) Ch. 2(heave)	4.03E-05 /FS	3.00E-01m	1.21E-05m		
3) Ch. 3(pitch)	6.67E-05 /FS	3.00E-01deg	2.00E-03deg		

Table 4 Results of uncertainty analysis of KG and k_{yy} measuring device

Error Sources	Error	Sensitivity	Bias Limit	Precision Index	Uncertainty
KG(2.4562E-01m)					
1) y2(1.795m)	1.00E-03m	1.00E+00	1.00E-03m		
2) x(2m)	1.00E-03m	7.75E-01	7.75E-04m		
3) Wm(410kg)	5.00E-01kg	3.78E-03m/kg	1.89E-03m		
4) W1(20kg)	2.00E-03kg	7.75E-02m/kg	1.55E-04m		
5) θ(0.041692rad)					
Bias error	5.00E-04rad	5.62E+01m/rad	2.81E-02m		
Random error	1.43E-07rad	5.62E+01m/rad		8.04E-06m	
6) θ1(0.12301rad)					
Bias error	5.00E-04rad	6.48E+00m/rad	3.24E-03m		
Random error	1.26E-07rad	6.48E+00m/rad		8.16E-07m	
			2.84E-02m	8.06E-06m	2.84E-02m
Gm(1.54957m)			2.83E-02m	8.06E-06m	2.83E-02m
Gd(0.70155m)					
1) W1	2.00E-03kg	8.42E-02m/kg	1.68E-04m		
2) Wd(169kg)	1.00E-01kg	9.96E-03m/kg	9.96E-04m		
3) x	1.00E-03m	9.57E-01	9.57E-04m		
4) y1(1.950m)	1.00E-03m	1.18E-01	1.18E-04m		
5) θ1					
Bias error	5.00E-04rad	1.57E+01m/rad	7.85E-03m		
Random error	1.26E-07rad	1.57E+01m/rad		1.98E-06m	
			7.97E-03m	1.98E-06m	7.97E-03m
k_{yy}(1.07401m)					
1) Tt(3.19712sec)					
Bias error	1.73E-04sec	1.36E+00m/sec	2.35E-04m		
Random error	2.84E-04sec	1.36E+00m/sec		3.86E-04m	
2) Wd	1.00E-01kg	4.38E-04m/kg	4.38E-05m		
3) Wm	5.00E-01kg	1.80E-04m/kg	9.00E-05m		
4) Gd					
Bias error	7.97E-03m	1.05E-01	8.37E-04m		
Random error	1.98E-06m	1.05E-01		2.08E-07m	
5) Gm					
Bias error	2.83E-02m	2.61E-01	7.39E-03m		
Random error	8.08E-06m	2.61E-01		2.11E-06m	
6) Ta(3.526sec)					
Bias error	1.73E-04sec	2.36E-01m/sec	4.08E-05m		
Random error	2.53E-04sec	2.36E-01m/sec		5.97E-05m	
			7.45E-03m	3.91E-04m	7.49E-03m

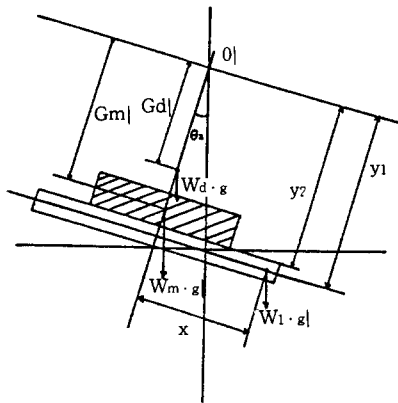
3.1.2 중량 분포 관련 오차

정현파중 운동시험 수행시에는 배수량과 트림 조정 이외에 중심의 위치(KG)와 종관성 반경(k_{yy})를 맞추기 위하여 모형선내에 중량을 적절히 분포하여야 하며 이에 관련된 오차를 정확히 구하기 위하여는 관성반경 측정 장비 자체의 오차요소들과 KG와 k_{yy}를 산출하기 위한 오차의 전과 과정 전체에 대한 체

계적인 분석이 필요하다. 본 연구를 위하여 사용된 관성 반경 측정 장비는 Fig. 3에 보여진 swinging table형식으로 KG와 k_{yy} 를 동시에 측정할 수 있다.

장비 자체의 오차 요소들은 Fig. 3에 나타난 장비의 기본 제원과 관련된 x , y_1 , y_2 모형선의 중량 (W_m), swinging table의 중량(W_d), 시편 중량 (W_1), 경사각 측정을 위한 가속도계 및 주기 측정기에 관한 오차로 구성된다.

Table 3에는 상기한 각 오차요소들의 오차 한계가 나와 있다. Table 4에는 KG와 k_{yy} 에 대한 고정 오차와 반복 오차가 나와 있으며 Appendix A에 계산 과정이 상세히 기술되어 있다.



- W_1 : Mass of test weight
- W_d : Mass of device
- W_m : Mass of model
- G_d : Distance between O and CG of device
- G_m : Distance between O and CG of model

Fig. 3 Free body diagram of inclining test with model and test weight

3.1.3 모형선 속도 관련 오차

본 연구에서 모형선 속도 관련 오차 추정 방법은 참고문헌[5]에서 제시된 과정에 따라 수행되었다. 모형선의 대수속도와 예인전차의 속도가 같다고 가정하면 모형선의 속도는 다음식에 의하여 결정된다.

$$V = \frac{(n/5000)\pi D}{t} = \frac{f\pi D}{5000} \quad (11)$$

여기서 D(m)는 예인전차 구동륜의 직경을 나타내 고 n은 시간 t가 경과하는 동안에 발생하는 펄스

의 갯수를 나타낸다. 위의 식으로 부터 모형선 속도의 오차 요소는 펄스 주파수, $f(= n/t)$ 와 구동륜의 직경, D임을 알 수 있다. Table 3에 각 오차 요소들의 오차한계와 식 (11)를 이용하여 구한 모형선 속도의 오차한계가 정리되어 있으며 Appendix B에 추정 과정이 상세히 기술되어 있다.

3.1.4 측정기기 관련 오차

운동시험시 측정 항목은 파고, 상하동요 및 종동요이며 파고는 servo needle type 파고계로 측정되었고 상하동요와 종동요는 4자유도 운동계측장비에 부착된 변위계(potentiometer)로 측정되었다. 입사파 진폭, ζ_a , 상하동요 진폭, H 그리고 종동요 진폭, θ 는 다음식과 같이 측정된 시계열로부터 구하여 진다.

$$\zeta_a = \frac{\bar{\zeta}_p - \bar{\zeta}_t}{2} \quad (12)$$

$$H = \frac{\bar{H}_p - \bar{H}_t}{2} \quad (13)$$

$$\theta = \frac{\bar{\theta}_p - \bar{\theta}_t}{2} \quad (14)$$

여기서 하첨자 p와 t는 각각 파정(peak)와 파저(trough)를 나타내며 bar는 single test 시계열에서 취득된 다수의 파정 또는 파저의 산출평균을 나타낸다. 또한 조우주파수, ω_e 는 다음식과 같이 구한다.

$$\omega_e = \frac{2\pi}{\bar{T}} \quad (15)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (T_{p,n+1} - T_{p,n}) \quad (16)$$

여기서 $T_{p,n}$ 은 n번째 파정에서의 시간을 나타낸다. 즉, \bar{T} 는 파정간 주기의 전체 평균을 나타낸다.

식 (12)를 DRE로 이용하여 파고의 고정오차를 구하면

$$B_{\zeta_a}^2 = \left(\frac{\partial \zeta_a}{\partial \bar{\zeta}_p} B_{\bar{\zeta}_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial \zeta_a}{\partial \bar{\zeta}_t} B_{\bar{\zeta}_t} \right)^2 + 2 \rho_{\zeta_p \zeta_t} \frac{\partial \zeta_a}{\partial \bar{\zeta}_p} \frac{\partial \zeta_a}{\partial \bar{\zeta}_t} B_{\bar{\zeta}_p} B_{\bar{\zeta}_t} \quad (17)$$

이 된다. 여기서 파정과 파저가 하나의 파고계로 계측한 파고의 시계열에 대한 값이므로 파정과 파저에 대한 파고계 고정오차의 상관계수, ρ_{pt} 는 1이 되는 완전 상관관계에 있으며 고정오차 한계도 동일 ($B_{\xi p} = B_{\xi t}$)하므로 식 (17)의 값은 0이 된다. 동일한 과정이 상하동요와 종동요에 대하여도 적용될 수 있다. 결과적으로, 파고계와 상하동요 및 종동요 계측 센서의 고정 오차는 전체 오차에 전혀 영향을 주지 않게 되므로 오차의 추정 과정에서 부터 제외될 수 있다.

상기한 고정 오차 성분과는 달리 각 계측기기의 검정(calibration)시 회귀곡선(regression curve)의 사용으로 인한 오차의 크기를 나타내는 추정표준오차(standard error of estimate, SEE)는 반복 오차에 포함시켰다[4]. 추정표준오차는 다음의 식으로 표현된다.

$$SEE^2 = \frac{1}{M-C} \sum_{k=1}^M (y_k - y_{LS,k})^2 \quad (18)$$

- M : 계측 횟수
- C : 회귀함수의 변수 수
- y_k : 계측치
- $y_{LS,k}$: 회귀 직선상 값

본 시험의 경우에는 검정결과를 직선에 근사 시켰으므로 $C = 2$ 가 된다. 계측 기기 검정의 통상적인 절차는 주어진 표준 물리량에 대응하는 계측 센서(sensor)의 응답을 측정하는 것이다. 그리고 이때 최소자승법을 사용함으로써 검정 곡선을 얻는 것이다. 더구나 규정된 근사함수는 검정된 양에 가장 충실한 것은 아니므로 검정 과정에서 불확실성은 검정함수의 부적절함에 기인한 오차와 측정된 값 y_k 의 분산성(scattering)에 기인한 오차를 포함하게 된다. 따라서 검정 과정에서 구한 SEE 값은 곡선 근사에 대하여 정밀도(precision index)로서 취해져야만 한다.

식 (18)에 의하여 추정된 계측기기에 관련된 오차 성분이 Table 3에 정리되어 있다. 동일한 Table에 표시된 A-D 변환기 관련 오차는 시험전에 행하여지는 전기적 검정(electric calibration)시 발생하는 오차 요소로서 위에서 언급한 계측 센서의 오차와 동일한 특성을 지니고 있으므로 반복 오차 성분만이 식 (18)에 준하여 추정되었다.

지금까지 고려한 계측기기 관련 오차요소는 전부 변화하지 않는 정적인 입출력에 관한 것이었다. 그러

나 운동시험과 같이 입력이 동적(dynamic)일 경우에는 그에 따른 계기의 동적 응답으로 인한 오차 요소도 고려해야 한다. 계측기기들은 동적 입력에 따른 동적 응답의 특성에 따라 zero-order, first-order 또는 second-order 기기 등으로 구분된다[9]. 상하동요와 종동요 계측에 사용되는 변위계(potentiometer)는 정적인 gain만이 있어서 동적응답에 따른 오차가 전혀 없는 zero-order 계측기기로 볼 수 있다. 그러나 servo needle type 파고계는 정확한 특성이 밝혀지지 않는지만 어느 정도 파고와 위상에 동적인 오차가 존재하는 것이 실험적으로 증명되었다. 본 논문에서는 Hirayama et al[8]의 결과를 인용하여 servo needle type 파고계의 동적 오차(dynamic error)로서 0.5mm를 사용하였다. 이 오차 성분은 계측 파고가 항상 실제 파고보다 낮게 측정되도록 하므로 비대칭성 오차, 즉 B^+ 값만이 존재하는 오차 성분이 된다.

3.1.5 해석 관련 오차

정현파중 운동시험 결과를 해석하는데는 여러 가지 해석법이 사용되고 있으나 그 중에서 주어진 시계열을 Fourier 변환하여 대표되는 주기를 구하고 최소자승법에 의하여 진폭과 위상을 구하는 방법(Fourier 변환법)과 파정과 파저를 검출하여서 그 자료를 이용하여 진폭과 주기를 구하는 방법(파정파저법)이 많이 쓰이고 있다[11]. 본 논문에서는 후자의 방법 즉, single test에 의하여 얻어진 시계열 중에서 파정과 파저를 따로 분리 해석하여 진폭 및 주파수를 구하고 그 해석 과정에 수반되는 고정 오차 및 반복 오차를 구하는 방법을 채택하였다. 전절에서도 언급한 바와 같이 계측 항목은 파고(ζ_a), 상하동요(H), 종동요(θ) 및 조우주파수(ω_e)로 식(12)~식(16)에 의하여 얻는다. 해석 관련 오차의 항목은 진폭에 대한 고정오차와 반복오차 그리고 주파수에 대한 반복 오차이다.

파고 또는 운동응답의 진폭에 대한 해석 과정에서 발생하는 고정 오차는 실험 결과와 동일한 주파수와 진폭을 가진 정현파를 이용하여 자료취득 간격의 반($0.5\Delta t$)에 해당하는 오차를 산출하여 사용하였으며 B^+ 값만이 존재하는 비대칭성 오차로 볼 수 있다.

주파수(ω_e), 파고(ζ_a), 상하동요(H) 및 종동요(θ)에 대한 반복오차는 식(12)~식(16)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{\zeta_a} = \left[\left(\frac{\partial \zeta_a}{\partial \zeta_p} S_{\zeta_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial \zeta_a}{\partial \zeta_t} S_{\zeta_t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

$$S_H = \left[\left(\frac{\partial H}{\partial H_p} S_{H_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial H_t} S_{H_t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

$$S_\theta = \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial \theta_p} S_{\theta_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \theta_t} S_{\theta_t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

$$S_{\omega_e} = \left[\left(\frac{\partial \omega_e}{\partial T} S_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (22)$$

여기서 S_{ζ_p} 와 S_{ζ_t} , S_{H_p} 와 S_{H_t} 및 S_{θ_p} 와 S_{θ_t} 는 파고, 상하동요 및 종동요에 대하여 파정과 파저 각각의 평균값에 대한 정확도(precision index)이며 S_T 는 파정간의 평균 주기에 대한 정확도이다.

3.2 주파수 응답 함수(RAO) 및 Overall Uncertainty

본 절에서는 최종 목표인 상하동요 및 종동요 주파수 응답함수(RAO)의 overall uncertainty를 얻기 위하여 앞절에서 구한 모든 오차요소들과 관련 DRE를 결합하는 과정을 기술한다.

모형선의 길이(L), 폭(B) 및 흘수(d)에 대한 오차와 KG 및 k_{yy} 에 대한 오차 및 모형선 속도에 대한 오차는 상하동요 및 종동요에 미치는 영향 즉, 오차 전파 방정식이 explicit하게 존재하지 않으므로 그 민감도(sensitivity)를 Strip 방법을 사용한 선박 운동 해석 프로그램을 사용하여 이론적으로 추정하였다.

상하동요 주파수 응답함수, H' 의 DRE는 다음과 같다.

$$H' = \frac{H}{\zeta_a} \quad (23)$$

H' 에 대한 고정 오차 한계, $B_{H'}$, 반복 오차 한계, $P_{H'}$, 그리고 overall uncertainty, $U_{H'}$ 는 다음식과 같다.

$$B_{H'} = \sqrt{\left(\frac{\partial H'}{\partial \zeta_a} B_{\zeta_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial H'}{\partial H} B_H \right)^2} \quad (24)$$

$$P_{H'} = \sqrt{\left(\frac{\partial H'}{\partial \zeta_a} P_{\zeta_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial H'}{\partial H} P_H \right)^2} \quad (25)$$

$$U_{H'} = \sqrt{(B_{H'})^2 + (P_{H'})^2} \quad (26)$$

종동요에 대한 불확실성 해석을 위하여는 파장 λ 에 대한 고정 오차 한계와 반복 오차 한계를 먼저 구해야 한다. 무한수심에서 파도의 분산 관계(dispersion relation)와 조우 주파수 ω_e 와 절대 주파수 ω 관계를 이용하면 λ 에 대한 DRE는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{8\pi g}{\left(-\frac{g}{V} + \sqrt{\left(\frac{g}{V} \right)^2 + \frac{4g\omega_e}{V}} \right)^2} \quad (27)$$

λ 에 대한 고정 오차 한계와 반복 오차 한계를 구하면 다음과 같다.

$$B_\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial V} B_V \right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \omega_e} B_{\omega_e} \right)^2} \quad (28)$$

$$P_\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial V} P_V \right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \omega_e} P_{\omega_e} \right)^2} \quad (29)$$

종동요 주파수 응답함수에 대한 DRE는 다음식과 같다.

$$\theta' = \frac{\theta}{\left(\frac{360\zeta_a}{\lambda} \right)} \quad (30)$$

θ' 에 대한 고정 오차 한계, $B_{\theta'}$, 반복 오차 한계, $P_{\theta'}$ 그리고 overall uncertainty, $U_{\theta'}$ 는 각각 다음과 같다.

$$B_{\omega}^* = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta'}{\partial \lambda} B_{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta'}{\partial \theta} B_{\theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta'}{\partial \zeta_{\omega}} B_{\zeta_{\omega}}\right)^2} \quad (31)$$

$$P_{\omega}^* = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta'}{\partial \lambda} P_{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta'}{\partial \theta} P_{\theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta'}{\partial \zeta_{\omega}} P_{\zeta_{\omega}}\right)^2} \quad (32)$$

$$U_{\omega}^* = \sqrt{(B_{\omega}^*)^2 + (P_{\omega}^*)^2} \quad (33)$$

RAO의 비교를 위한 독립변수로서는 실제 시험에서 측정되는 조우 주파수, ω_e 보다는 무차원화된 절대주파수, $\omega\sqrt{L/g}$ 가 사용된다. 조우주파수 ω_e 와 절대주파수 ω 는 다음식과 같은 관계가 있다.

$$\omega_e = \omega - \frac{V\omega^2}{g} \cos\chi \quad (34)$$

선수파의 경우($\chi = 180^\circ$)에 대하여 식 (34)을 변형시키고 무차원화시키면 다음과 같이 주파수에 대한 DRE가 구해진다.

$$\omega' = \omega\sqrt{\frac{L}{g}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{g}} \left(-\frac{g}{V} + \sqrt{\left(\frac{g}{V}\right)^2 + \frac{4g\omega_e}{V}}\right) \quad (35)$$

오차 요인이 되는 변수들은 ω_e , L 그리고 V가 되며 또한 무차원화된 절대주파수 ω' 에 대한 고정 오차 한계, $B_{\omega'}$, 반복 오차 한계, $P_{\omega'}$ 그리고 overall uncertainty, $U_{\omega'}$ 은 각각 다음과 같다.

$$B_{\omega'} = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta'}{\partial V} B_V\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta'}{\partial L} B_L\right)^2} \quad (36)$$

$$P_{\omega'} = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta'}{\partial V} P_V\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta'}{\partial L} P_L\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta'}{\partial \omega_e} P_{\omega_e}\right)^2} \quad (37)$$

$$U_{\omega'} = \sqrt{(B_{\omega'})^2 + (P_{\omega'})^2} \quad (38)$$

식 (26)과 (33)이 각각 상하동요 주파수 응답 함수와 종동요 주파수 응답함수의 overall uncertainty를 나타내며 식 (38)은 독립변수 ω' 의 overall uncertainty를 나타낸다. 독립변수 ω' 에 발생하는 overall uncertainty를 종속변수 즉 상하동요와 종동요의 overall uncertainty에 다음식과 같은 과정에 의하여 결합하면 상하동요와 종동요에 대한 최종 overall uncertainty가 얻어진다.

$$\tilde{U}_{H'}^* = \sqrt{(U_{H'}^*)^2 + \left(\frac{\partial H'}{\partial \omega'} U_{\omega'}\right)^2} \quad (39)$$

$$\tilde{U}_{\theta'}^* = \sqrt{(U_{\theta'}^*)^2 + \left(\frac{\partial \theta'}{\partial \omega'} U_{\omega'}\right)^2} \quad (40)$$

4. 결과 해석

운동 모형시험은 상하동요와 종동요의 RAO가 큰 경우를 포함하여 6개의 규칙파에 대하여 수행되었으며 Table 5는 $\omega_e = 5.26E+00$ 인 경우 각 계측 항목과 상하동요 및 종동요 RAO에 대한 overall uncertainty 결과가 자세히 나와 있다. Table의 마지막 부분은 해당되는 주파수에서의 상하동요 및 종동요의 RAO 값과 overall uncertainty이다.

이 결과에 의하면 상하동요 RAO의 overall uncertainty 중에서 반복오차는 변위 센서의 검정시 발생하는 오차의 영향이 가장 큰 것으로 나타나고 있으며 고정오차는 유사한 크기의 여러 오차요소의 합으로 되어 있으나 파고계의 동적 오차 성분과 k_{yy} 에 대한 오차 성분의 영향이 비교적 큰 것으로 되어 있다. 또한 조우주파수(ω_e)가 커짐에 따라 파고, 상하동요 및 종동요 시계열 해석시 발생하는 진폭과 주파수에 대한 고정 오차가 커지는 경향을 보여 주고 있다. 종동요 RAO의 overall uncertainty도 상하동요의 경우와 동일한 성격을 띠고 있으며 종동요 변위 센서의 검정

Table 5 Results of uncertainty analysis for motion (single test) ($F_n = 2.75E-01$, $\omega_e = 5.26E+00$)

Error Sources	Errors	Sensitivity	Bias Limit	Precision Index	Uncertainty
ζ_0 (0.03998)					
1) Wave probe					
Dynamic error(B ⁺)	5.00E-04m	1.00E+00	5.00E-04m		
(B ⁻)	0.00E+00m	1.00E+00	0.00E+00m		
Calibration error	6.46E-05m	7.07E-01		4.56E-05m	
2) A-D converter					
Bias error	1.76E-05m	7.07E-01		1.24E-05m	
3) Analysis					
Bias error(B ⁺)	2.45E-04m	1.00E+00	2.45E-04m		
Bias error(B ⁻)	0.00E+00m	1.00E+00	0.00E+00m		
Random error	5.62E-06m	1.00E+00		5.62E-06m	
$U_{\zeta_0}^{+}$			5.57E-04m	7.34E-05m	3.76E-04m
$U_{\zeta_0}^{-}$			0.00E+00m	7.34E-05m	1.47E-04m
H(Heave) (0.05085)					
1) 4-component					
Bias error	6.48E-04m	7.07E-01		4.58E-04m	
2) A-D converter					
Bias error	1.21E-05m	7.01E-01		8.56E-05m	
3) Analysis					
Bias error(B ⁺)	3.11E-04m	1.00E+00	3.11E-04m		
Bias error(B ⁻)	0.00E+00m	1.00E+00	0.00E+00m		
Random error	2.95E-05m	1.00E+00		2.95E-05m	
4) KG					
Bias error	2.84E-02m	8.27E-03	2.35E-04m		
Random error	8.08E-06m	8.27E-03		6.68E-08m	
5) K _{yy}					
Bias error	7.45E-03m	9.40E-02	7.00E-04m		
Random error	3.91E-04m	9.40E-02		3.68E-05m	
6) L					
Bias error	1.00E-03m	1.91E-02	1.91E-05m		
7) B					
Bias error	1.00E-03m	1.63E-01	1.63E-04m		
8) d					
Bias error	2.97E-04m	4.91E-01	1.46E-04m		
9) V					
Bias error	2.30E-03m/s	2.45E-01sec	5.64E-04m		
Random error	1.50E-03m/s	2.45E-01sec		3.68E-04m	
U_H^{+}			1.00E-03m	5.96E-04m	1.55E-03m
U_H^{-}			9.55E+04m	5.96E-04m	1.52E-03m
θ (2.76781)					
1) 4-component					
Bias error	6.48E-02deg	7.07E-01		4.84E-02deg	
2) A-D converter					
Bias error	2.00E-03deg	7.01E-01		1.41E-03deg	
3) Analysis					
Bias error(B ⁺)	1.69E-02deg	1.00E+00	1.69E-02deg		
Bias error(B ⁻)	0.00E+00deg	1.00E+00	0.00E+00deg		
Random error	1.63E-03deg	1.00E+00		1.63E-03deg	
4) KG					
Bias error	2.84E-02m	5.52E-03deg/m	1.57E-04deg		
Random error	8.08E-06m	5.52E-03deg/m		4.46E-08deg	
5) K _{yy}					
Bias error	7.45E-03m	4.66E-02deg/m	3.47E-04deg		
Random error	3.91E-04m	4.66E-02deg/m		1.82E-05deg	
6) L					
Bias error	1.00E-03m	1.91E-02deg/m	1.91E-05deg		
7) B					
Bias error	1.00E-03m	1.83E-01deg/m	1.83E-04deg		
8) d					
Bias error	2.97E-04m	3.70E-01deg/m	1.10E-04deg		
9) V					
Bias error	2.30E-03m/s	1.44E-01deg s/m	3.31E-04deg		
Random error	1.50E-03m/s	1.44E-01deg s/m		2.16E-04deg	
U_{θ}^{+}			1.69E-02deg	4.84E-02deg	9.83E-02deg
U_{θ}^{-}			5.48E-04deg	4.84E-02deg	9.68E-02deg

Error Sources	Errors	Sensitivity	Bias Limit	Precision Index	Uncertainty
λ (5.759118)					
1) V					
Bias error	2.30E-03m/s	1.73E+00 s	3.98E-03m		
Random error	1.50E-03m/s	1.73E+00 s		2.50E-03m	
$3\omega_e$	3.71E-02/s	1.59E+00 ms		5.90E-02m	
			3.98E-03m	5.91E-02m	1.18E-01m
$\omega\sqrt{L/g}$ (2.21574)					
1) V					
Bias error	2.30E-03m/s	3.33E-01s/m	7.66E-04		
Random error	1.50E-03m/s	3.33E-01s/m		4.99E-04	
2) L					
Bias error	1.00E-03m	2.46E-01/m	2.46E-04		
$3\omega_e$	3.71E-02/s	3.05E-01 s		1.13E-02	
			8.05E-04	1.13E-02	2.26E-02
Heave RAO(1.27189)					
1) \ddot{m}					
Bias error(B ⁺)	5.57E-04m	$3.18E+01(H/\zeta_m)^2$	1.77E-02		
Bias error(B ⁻)	0.00E+00m	$3.18E+01(H/\zeta_m)^2$	0.00E+00		
Random error	7.34E-05m	$3.18E+01(H/\zeta_m)^2$		2.33E-03	
2) H					
Bias error(B ⁺)	1.00E-03m	$2.50E+01(1/\zeta_m)$	2.50E-02		
Bias error(B ⁻)	9.55E-04m	$2.50E+01(1/\zeta_m)$	2.39E-02		
Random error	5.96E-04m	$2.50E+01(1/\zeta_m)$		1.49E-02	
U^{+}			3.06E-02	1.51E-02	4.30E-02
U^{-}			2.39E-02	1.51E-02	3.85E-02
$(\theta/\zeta_m) \lambda / 360$ (1.10751)					
1) λ					
Bias error	3.98E-03m	$1.92E-01(\theta/360(m))$	7.64E-04		
Random error	5.91E-02m	$1.92E-01(\theta/360(m))$		1.13E-02	
2) ζ_m					
Bias error(B ⁺)	5.57E-04m	$2.77E+01(1/360(m)^2)$	1.54E-02		
Bias error(B ⁻)	0.00E+00m	$2.77E+01$	0.00E+00		
Random error	7.34E-05m	$2.77E+01(1/360(m)^2)$		2.04E-03	
3) θ					
Bias error(B ⁺)	1.69E-02deg	$4.00E-01(\theta/360(m)^2)$	6.76E-03		
Bias error(B ⁻)	5.48E-04deg	$4.00E-01$	2.19E-04		
Random error	4.84E-02deg	$4.00E-01(\theta/360(m)^2)$		1.94E-02	
U^{+}			1.68E-02	2.25E-02	4.80E-02
U^{-}			7.95E-04	2.25E-02	4.50E-02
Heave RAO 1.27189 Total uncertainty range(-0.0406~0.0449)					
Pitch RAO 1.10751 Total uncertainty range(-0.0464~0.0493)					

오차와 파고계의 동적오차가 거의 대부분을 차지하고 있다.

상기 오차중에서 계기 검정시 발생하는 오차는 정밀한 검정에 의하여 사전에 상당 부분을 제거할 수 있는 오차 성분이므로 overall uncertainty 범위를 대폭 축소시키는 것이 가능하다고 본다. 그리고 절대주파수 자체가 크거나 선속의 증가에 따라 조우주파수가 커지는 경우에는 해석오차를 작게 하기 위하여 시

계열 한 주기에 20개 이상의 자료 취득이 되도록 총 당 자료 취득 갯수를 증가시킬 필요가 있다.

Table 6에는 상하동요 및 종동요의 RAO와 overall uncertainty가 종합 정리되어 있다. 전체적으로 종동요 RAO의 overall uncertainty가 상하동요 RAO의 overall uncertainty 보다 큰 결과를 보여 주고 있다. 주파수가 커짐에 따라 오차 비율이 커지는 것은 오차 크기의 변화보다 RAO 자체가 작아지기 때문이다.

Fig. 4~Fig. 6는 계측된 파고, 상하동요 및 종동요의 값과 오차한계를 보여 주고 있다. 그리고 조우주

파수에 대한 오차한계는 수평선으로 표시되어 있다.

Table 6 Overall uncertainty of heave and pitch RAO

$\omega\sqrt{L/g}$	λ/L	H'	\bar{U}_H (%)	\bar{U}_H (%)	θ'	\bar{U}_θ (%)	\bar{U}_θ (%)
1.773	2.00	1.033	0.0197(1.96%)	0.0217(2.16%)	1.138	0.0452(3.99%)	0.0464(4.08%)
2.045	1.50	1.124	0.0345(3.07%)	0.0374(3.33%)	1.231	0.0449(3.64%)	0.0475(3.86%)
2.216	1.28	1.272	0.0406(3.19%)	0.0449(3.53%)	1.108	0.0464(4.19%)	0.0493(4.45%)
2.416	1.08	1.042	0.0321(3.08%)	0.0366(3.51%)	0.772	0.0418(5.41%)	0.0442(5.72%)
2.655	0.89	0.317	0.0332(10.47%)	0.0340(10.72%)	0.320	0.0373(11.66%)	0.0379(11.86%)
3.430	0.53	0.067	0.0516(77.5%)	0.0517(77.6%)	0.0073	0.0364(500%)	0.0364(500%)

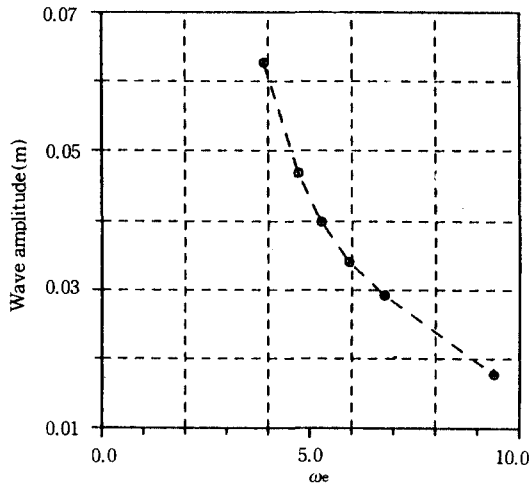


Fig. 4 Wave amplitude(ζ_a) and range of uncertainty

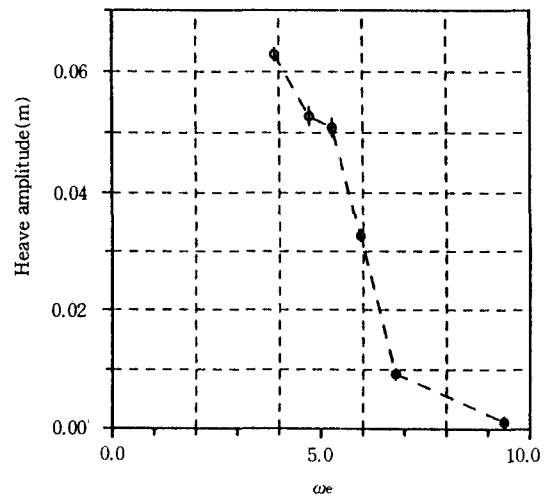


Fig. 5 Heave(H) and range of uncertainty

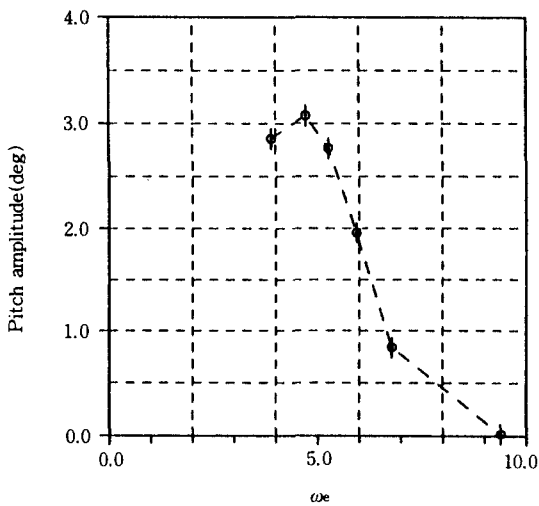


Fig. 6 Pitch(θ) and range of uncertainty

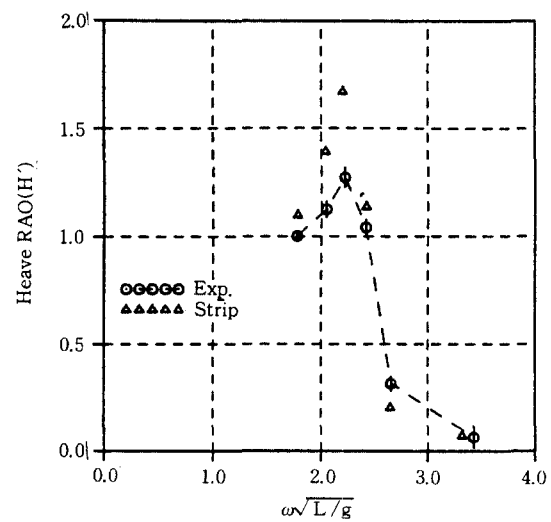


Fig. 7 Heave RAO(H') and range of uncertainty

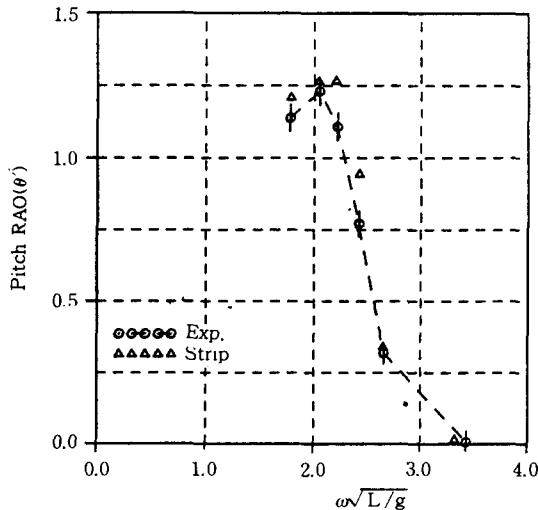


Fig. 8 Pitch RAO(θ') and range of uncertainty

Fig. 7과 Fig. 8은 상하동요 및 종동요 RAO와 overall uncertainty 그리고 Strip법을 이용한 운동 해석 결과와의 비교를 보여 주고 있다. 상하동요 RAO의 경우 특히 peak 부분에서 해석 결과와 모형 시험 결과가 크게 차이 나는 것을 알 수 있다. 종동요 RAO도 peak부분과 RAO가 급격히 변화하는 부분에서 큰 차이를 보여 주고 있다. Strip법을 이용한 해석 결과와 모형시험 결과와의 이러한 차이는 ITTC 내 항성 분과에서 수행한 국제 공동연구 보고서[6][7]

Table 7 Heave and pitch RAO of other single tests

$\omega\sqrt{L/g} = 2.045$		$\omega\sqrt{L/g} = 2.655$	
Heave	Pitch	Heave	Pitch
1.124	1.233	0.317	0.325
1.136	1.244	0.330	0.338
1.131	1.238	0.331	0.337
1.129	1.236	0.299	0.314
1.125	1.223	0.301	0.314
1.119	1.239	0.323	0.332
1.121	1.233	0.315	0.325
1.127	1.240	0.317	0.324
1.125	1.235	0.313	0.322
1.124	1.223	0.317	0.332
1.115	1.227	0.315	0.326
1.122	1.233	0.305	0.320
1.118	1.234	0.312	0.326
1.127	1.236	0.309	0.318
1.127	1.237	0.308	0.320
1.129	1.237	0.304	0.317
1.124	1.246	0.302	0.317
1.116	1.238	0.307	0.323
1.127	1.237	0.308	0.322
1.120	1.229	0.318	0.330

에도 이미 언급되어 있다.

Table 7은 2가지 정현파에 대하여 각 20번씩 반복 시험을 수행하여 각 single test에 대하여 파정 파저 범으로 상하동요와 종동요 RAO를 구한 결과를 보여 주고 있다. Table 7의 각 single test 결과가 Table 6에 있는 95% 신뢰 구간내에 전부 포함되고 있다는 점과 20번의 반복시험이 3~4일에 걸쳐서 수행된 결과임을 고려하면 모형시험의 반복 재현성(repeatability)이 확인될 수 있으며 overall uncertainty 추정 방법에 타당성이 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

- 1) 본 연구를 통하여 정현파중 운동 모형시험에 대한 불확실성 해석 방법이 정립되었다.
- 2) 해석 결과 상하동요 RAO는 약 $\pm 3.0\%$ 그리고 종동요 RAO는 약 $\pm 5.0\%$ 에 해당하는 95% 신뢰 구간이 형성되는 것을 알 수 있다.
- 3) 다수의 반복시험시 구한 상하동요 및 종동요 RAO가 single test에 대한 오차 해석 결과 얻어진 95% 신뢰구간 내에 존재하므로 시험의 반복 재현성 및 오차해석 과정의 타당성이 확인되었다.
- 4) Strip법에 의한 운동해석 결과가 비교적 넓은 주파수 범위에서 계측 결과의 95% 신뢰구간 외부에 존재함을 알 수 있으며 Strip법에 의한 선박 운동 성능 추정법에 개선이 필요하다.
- 5) 본 연구 결과의 개선 및 불규칙파중 운동시험에 대한 연구에로의 확장을 위하여는 운동시험과 같은 동적인 실험에 대한 불확실성 해석을 위한 학문적인 연구가 수행되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] ANSI/ASME PTC 19.1-1985, "Measurement Uncertainty, Supplement on Instrument and Apparatus", Part 1, ASME, New York, 1986
- [2] Report of the Panel on Validation Procedures, Proc. of the 19th ITTC, Madrid, 1990
- [3] Himeno, Y., Nishio, S. and Takamatsu, K., "Application of Uncertainty Analysis for Resistance Test", J. Kansai Soc. N.A., Japan, 1990, Vol. 214

[4] Nishio, S., Himeno, Y. and Takamatsu, K., "Application of Measurement - Uncertainty Analysis to Resistance and Self Propulsion Tests of Ship Model", *J. Kansai Soc. N.A.*, Japan, 1991, Vol. 216

[5] Fogash, K., "Measurement Uncertainty Analysis of Ship Model Resistance and Self Propulsion Tests", Private Communication

[6] Report of the Seakeeping Committee, *Proc. of the 15th ITTC*, 1978

[7] Report of the Seakeeping Committee, *Proc. of the 16th ITTC*, 1981

[8] Hirayama, T., Himeno, M., Inoue, R., "On the Accuracy of Seakeeping Tank Tests and a Project of Comparative Seakeeping Experiment", *5th Marine Dynamics Symposium*, Japan, 1988

[9] Coleman, H.W., and Steele, W.C., "Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers", *A Willy & Sons*, New York, N.Y., 1989

[10] 엄덕준, "수조시험에 의한 내항성능의 평가/응용", 1992년도 하계강습회, 대한조선학회, 1992

[11] Report of the Ocean Engineering Committee, *Proc. of the 18th ITTC*, 1987.

Appendix A 중량분포관련오차 및 오차의 전파

관성 반경측정 장비 자체의 오차 요인은 Fig. 3에 나타난 장비의 기본 체원과 관련된 x, y_1, y_2 모형선의 중량(W_m), swinging frame의 중량(W_d), 시험 중량(W_1)으로 구성되며 계기 오차로는 가속도계 오차, 시간 측정기 오차로 구성된다.

KG에 대한 DRE는 다음식과 같다.

$$KG = y_2 - G_m = y_2 - \frac{W_1 \cdot x}{W_m} (\cot\theta_2 - \cot\theta_1) \quad (A-1)$$

여기서 θ_1 은 모형선 없이 시험 중량(W_1)만을 장비에 올려 놓은 상태에서의 경사각이고 θ_2 는 모형선과 시험 중량을 다 장비에 올려 놓은 상태에서의 경사각

을 나타낸다.

KG에 대한 고정오차 한계, B_{KG} , 반복오차 한계, P_{KG} 그리고 overall uncertainty, U_{KG} 는 다음과 같다.

$$B_{KG} = \sqrt{\left(\frac{\partial KG}{\partial y_2} B_{y_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial KG}{\partial W_m} B_{W_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial KG}{\partial W_1} B_{W_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial KG}{\partial x} B_x\right)^2 + \left(\frac{\partial KG}{\partial \theta_2} B_{\theta_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial KG}{\partial \theta_1} B_{\theta_1}\right)^2} \quad (A-2)$$

$$P_{KG} = \sqrt{\left(\frac{\partial KG}{\partial y_2} P_{y_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial KG}{\partial W_m} P_{W_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial KG}{\partial W_1} P_{W_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial KG}{\partial x} P_x\right)^2 + \left(\frac{\partial KG}{\partial \theta_2} P_{\theta_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial KG}{\partial \theta_1} P_{\theta_1}\right)^2} \quad (A-3)$$

$$U_{KG} = \sqrt{(B_{KG})^2 + (P_{KG})^2} \quad (A-4)$$

KG를 맞추는 과정이 끝나면 종관성 반경(k_{yy})을 맞추어야 한다. 우선 k_{yy} 를 시험하기 전 G_d 와 G_m 를 알아야 하며 G_m 은 식 (A-1)에서 구할 수 있고 G_d 는 다음식으로 표현된다.

$$G_d = \frac{W_1}{W_d} (x \cot\theta_1 - y_1) \quad (A-5)$$

고정오차 한계, B_{G_d} , 반복오차 한계, P_{G_d} 그리고 overall uncertainty, U_G 는 다음과 같다.

$$B_{G_d} = \sqrt{\left(\frac{\partial G_d}{\partial W_1} B_{W_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial G_d}{\partial W_d} B_{W_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial G_d}{\partial x} B_x\right)^2 + \left(\frac{\partial G_d}{\partial \theta_1} B_{\theta_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial G_d}{\partial y_1} B_{y_1}\right)^2} \quad (A-6)$$

$$P_{G_d} = \sqrt{\left(\frac{\partial G_d}{\partial W_1} P_{w_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial G_d}{\partial W_d} P_{w_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial G_d}{\partial X} P_X\right)^2 + \left(\frac{\partial G_d}{\partial \theta_1} P_{\theta_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial G_d}{\partial y_1} P_{y_1}\right)^2} \quad (A-7)$$

$$U_{G_d} = \sqrt{(B_{G_d})^2 + (P_{G_d})^2} \quad (A-8)$$

k_{yy} 를 맞추는 과정은 동적과정이므로 우선 swinging frame 만의 동요 주기(T_d)를 구하고 모형선을 올려 놓은 상태에서 동요주기(T_t)를 구해야 한다. 종관성 반경(k_{yy})에 대한 DRE는 다음식과 같다.

$$k_{yy}^2 = g \left(\frac{T_t}{2\pi} \right)^2 \left(\frac{W_d}{W_m} G_d + G_m \right) - G_m^2 - g \left(\frac{T_d}{2\pi} \right)^2 \frac{W_d}{W_m} G_d \quad (A-9)$$

k_{yy} 에 대한 고정오차 한계, $B_{k_{yy}}$, 반복오차 한계, $P_{k_{yy}}$ 그리고 overall uncertainty, $U_{k_{yy}}$ 는 다음과 같다.

$$B_{k_{yy}} = \sqrt{\left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial T_t} B_{T_t}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial W_d} B_{W_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial W_m} B_{W_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial G_d} B_{G_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial G_m} B_{G_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial T_d} B_{T_d}\right)^2} \quad (A-10)$$

$$P_{k_{yy}} = \sqrt{\left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial T_t} P_{T_t}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial W_d} P_{W_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial W_m} P_{W_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial G_d} P_{G_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial G_m} P_{G_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial k_{yy}}{\partial T_d} P_{T_d}\right)^2} \quad (A-11)$$

$$U_{k_{yy}} = \sqrt{(B_{k_{yy}})^2 + (P_{k_{yy}})^2} \quad (A-12)$$

식 (A-4), (A-10)는 각각 KG와 k_{yy} 의 overall uncertainty를 나타낸다.

Appendix B 모형선 속도 관련 오차

모형선의 대수속도와 예인전차의 속도가 같다고 가정하면 모형선의 속도는 다음식에 의하여 결정된다.

$$V = \frac{(n/5000)\pi D}{t} = \frac{\pi f D}{5000} \quad (B-1)$$

여기서 D(m)는 예인전차 구동륜의 직경을 나타내고 n은 시간 t가 경과하는 동안 구동륜의 연결된 encoder의 photo coupler가 감지하는 광 pulse의 갯수이다. 예인전차 구동륜이 1회전 할 때 5,000개의 광 pulse가 발생되도록 구성되어 있다.

식 (B-1)에 의하면 모형선의 속도에 대한 오차요인은 광 pulse 주파수, $f (=n/t)$ 와 구동륜의 직경, D 임을 알 수 있다.

모형선의 속도와 관계있는 2개의 고정 오차요소 B_D 와 B_f 는 다음과 같다.

1) B_D : 구동륜 직경의 고정오차 한계

$$D = 0.159155m, \quad B_D = \pm 2.00E-04m$$

2) B_f : 광 pulse 주파수의 고정오차 한계

$$\text{time base error} = 0.000001$$

$$\text{gate time} = 1.0 \text{ sec}$$

$$\text{trigger error} = 0.00000105 \text{ sec}$$

$$\text{LSD}$$

$$= \text{least significant digit} = 0.1 \text{ pulses/sec}$$

$$f = \text{nominal frequency} = 5000V/\pi D$$

$$= 18270 \text{ pulses/second}$$

$$\text{resolution} = \pm \text{LSD} \pm \frac{\sqrt{2} \times f \times \text{trigger error}}{\text{gate time}}$$

$$= \pm 1.27E-01$$

$$\text{accuracy} = \pm \text{resolution} \pm f \times \text{time base error}$$

$$= \pm 0.1454 \text{ pulses/second}$$

$$B_f = \pm 0.1454 \text{ pulses/second}$$

모형선 속도의 고정오차 한계는 다음식과 같이 된다.

$$B_V = \left[\left(\frac{\partial V}{\partial D} B_D \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial f} B_f \right)^2 \right]^{1/2} \quad (B-2)$$

결과적으로 모형선 속도의 고정오차 한계, B_V 는 다음과 같다.

$$B_V = [(11.48 \times 0.0002)^2 + (0.0001 \times 0.1454)^2]^{1/2} = 2.30E-03 \text{m/s}$$

모형선의 반복오차 한계, P_f 는 모형시험 수행중 예인전차 내부의 digital counter에서 읽어 들이는 광 pulse 주파수의 시간에 따른 변화와 관계가 있다. 당 연구소의 시스템은 예인전차 속도가 정상에 달하였을 때 digital counter 의 다섯번째 자리 숫자가 점멸 함이 관측되었다. 즉,

$$P_f = 30 \text{pulses /second}$$

따라서

$$P_V = \frac{\partial V}{\partial f} P_f = 0.0001 \times 30 \\ = \pm 3.00E - 03 \text{ m/s}$$

모형선 속도의 overall uncertainty는

$$U_V = [(B_V)^2 + (P_V)^2]^{1/2} \\ = [(0.00230)^2 + (0.0030)^2]^{1/2} \\ = \pm 3.78E - 03 \text{ m/s}$$

따라서, 모형선 속도의 신뢰구간은 1.827m/s $\pm 3.78E-03 \text{m/s}$ ($\pm 0.207\%$)이다.