

## 선미 규칙파 중 고속 활주선의 연직면 운동에 대한 실험적 연구

김동진<sup>†\*</sup>, 이기표\*, 유영준\*, 박한솔\*

서울대학교 조선해양공학과\*

An Experimental Study on the Vertical Motion  
of a High-Speed Planing Craft in Regular Following Waves

Dong-Jin Kim<sup>†\*</sup>, Key-Pyo Rhee\*, Young-Jun You\* and Han-Sol Park\*

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University\*

### Abstract

It is well known that when a high-speed planing craft travels in following seas it experiences long-periodic motions due to low encounter frequency, and it often loses its course keeping stability. Therefore, it is necessary to study the sea-keeping performance and stability of it in the following seas. In this paper, the vertical motions of a planing craft were measured in following regular waves, and the test results were compared with the theoretical results. In the case of the same encounter frequency, non-dimensionalized motion amplitudes become larger as Froude number is higher, and non-dimensionalized motion amplitudes in head waves are larger than those in following waves. The mean values of the motions in following waves are similar to the running attitudes of a craft in calm water at the same Froude number.

※Keywords: High-speed planing craft(고속 활주선), Regular following waves(선미 규칙파), High-speed towing test(고속 예인 시험), Vertical motion response(연직면 운동응답)

### 1. 서론

고속선이 파랑 중에서 항행할 경우 다양한 입사각의 파를 받게 되는데, 선미파 및 선미사파를 받

으면서 고속으로 항행할 경우 조종성 및 침로 안정성이 특히 문제시 된다. 선미파 및 선미사파 중에서는 조우주파수가 낮아지므로 장주기의 선체 운동이 발생하기 쉬우며 surf-riding, broaching, 전복 현상 등이 종종 발생한다(Son 1995). 또한 파와 선체의 상대적인 위치에 따라 복원력이 현저하게 변화하기 쉽다. 따라서 고속선의 조종성 및

접수일: 2009년 11월 9일, 승인일: 2010년 6월 21일

† 교신저자: kdj8277@snu.ac.kr, 010-3094-4007

침로 안정성을 유지하기 위해서는 선미파 중 운동 응답에 대한 연구가 필요하다.

Kerwin(1955), Paulling(1961), Hamamoto(1985) 등은 선미파 중에서 선체에 작용하는 유체력 계산 방법을 정립하고 복원 성능을 추정하였다. Son and Kim(1984), Son and Yun(1989)은 선미파 중 선박이 받는 파강제력 및 복원력 계산법을 개선하고 계산 결과와 실험 결과를 비교하였다. Shigehiro(1993)는 선수파 및 선미파 중에서 고속 쌍동선 모형 시험을 수행하였고, Shirazawa and Ikeda(1996)는 역시 선수파 및 선미파 중에서 고속 여객선의 모형 시험을 실시하였다. 그러나 위 연구들에서 수행한 고속선 모형 시험은 선박과 선미파의 상대적인 속도 차이나 조우주파수 등을 고려하지 않은 한계가 있다.

저자는 정수 중(Kim et al. 2009(a)) 및 선수 규칙파 중(Kim et al. 2009(b))에서 활주형 고속선의 연직면 운동 응답 실험 및 이론 계산을 수행한 바 있다. 이어지는 본 연구는 활주형 고속선의 선미파 중 운동 성능을 파악하기 위한 기초 연구로서, 다양한 주기를 갖는 선미 규칙파를 생성한 후 여러 가지 예인 속도에 대해 고속선의 연직면 운동을 예측하였다. 동일한 조우주파수에 대해 운동 진폭 및 위상을 분석하고 선수파, 혹은 정수 중의 실험 결과와 비교하였으며, 이론적인 계산 결과와도 비교, 분석을 수행하였다.

## 2. 조우주파수와 속도 영역

### 2.1 입사각별 파주파수와 조우주파수의 관계

규칙파 중에서 고속선이 운항할 경우 전진 속도를  $U_0$ , 파 입사각을  $\mu$ , 중력 가속도를  $g$ 라고 하면 파주파수  $\omega$ 와 조우주파수  $w_e$ 의 관계는 식 (1)과 같다.

$$w_e = \omega - \frac{U_0}{g} \omega^2 \cos \mu \quad (1)$$

단, 파 입사각은 파가 선미로 입사할 경우를  $0^\circ$ 로 하고 반시계방향으로 돌면서 각도가 증가하여 우현으로 입사할 경우를  $90^\circ$ , 선수로 입사할 경우를  $180^\circ$  등으로 정의한다.

식 (1)에 의하면  $90^\circ < \mu < 270^\circ$ , 즉 선수파, 혹은 선수사파(head or bow waves)일 때 조우주파수는 파주파수에 대한 양의 2차 함수 형태이며 일대일 대응 관계이다.  $\mu = 90^\circ$ , 혹은  $\mu = 270^\circ$ , 즉 횡파(beam waves)일 때 조우주파수와 파주파수가 같으며 역시 일대일 대응 관계이다.  $0^\circ < \mu < 90^\circ$ 이나  $270^\circ < \mu < 360^\circ$ , 즉 선미파, 혹은 선미사파(following or quartering waves)일 경우 조우주파수는 파주파수에 대한 음의 2차 함수 형태이며 일대일 대응이 아니다. 위의 세 가지 경우에 대한 조우주파수와 파주파수의 관계 그래프를 정리하면 Fig. 1과 같다.

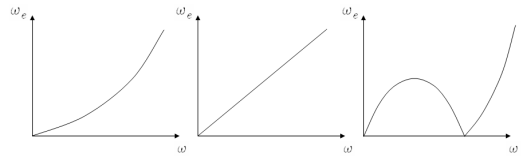


Fig. 1 Variation of encounter frequency with wave frequency in head/bow waves(left), beam waves(middle), and following/quartering waves (right)

### 2.2 선미 규칙파의 속도 영역 정의

선미파, 혹은 선미사파인 경우 낮은 조우주파수 영역에서는 하나의 조우주파수에 대해 최대 3개의 파주파수가 대응된다.

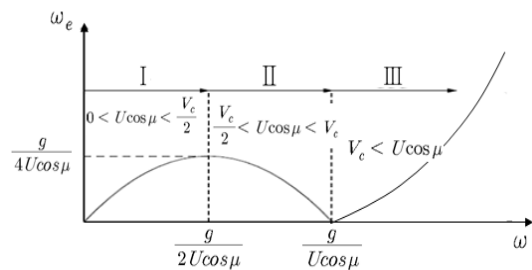


Fig. 2 Variation of encounter frequency with wave frequency in following or quartering waves

Fig. 2와 같이 선속에 따라 I, II, III 세 영역으로 구분할 수 있으며,  $V_c$ 는 파의 위상속도,

$V_c/2$ 는 파의 군속도이다. 따라서  $\mu = 0^\circ$ 인 선미 파의 경우 I은 선속이 파의 군속도보다 느린 영역이고, II는 선속이 파의 군속도와 위상속도 사이에 있는 영역이며, III는 선속이 파의 위상속도보다 빠른 영역이다.

### 3. 규칙파 중 고속선 운동 응답 추정법

Martin(1976), Baek(1986) 등의 연구를 참고하면 규칙파 중 주형(prismatic) 활주형 고속선의 운동 응답 추정식은 다음과 같다.

우선 고속선의 연직면 운동을 표현하는 좌표계를 Fig. 3에 나타내었다. 자유표면과 평행한 전방을 X좌표, 연직 하방을 Z좌표로 하고 정수 중 항주 시의 무게 중심 위치를 원점으로 하여 등속 U로 움직이는 등속 이동 좌표계 O-XYZ와, 선수 방향을 x좌표, 선저 방향을 z좌표로 하고 고속선의 무게 중심에 원점이 고정된 선체 고정 좌표계 o-xyz로 구성된다.

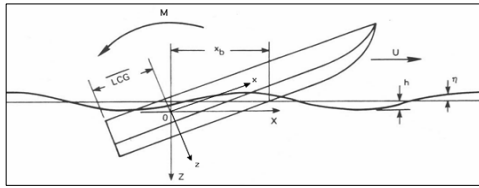


Fig. 3 Coordinate system

연직면 상의 상하 동요 및 종동요 연성 운동 방정식은 식 (2), (3)과 같다. 변위, 속도, 가속도에 대한 선형항만을 고려한 식이며 우변은 조우주파수  $w_e$ 인 규칙파에 의한 파 강제력 및 강제모멘트이다. 수식에서 모든 항은 무차원화 된 값이다.

$$(m - Z_z)\ddot{z} - Z_z\dot{z} - Z_z z - Z_\theta\ddot{\theta} - Z_\theta\dot{\theta} - Z_\theta\theta = Z_w e^{-iw_e t} \quad (2)$$

$$-M_z\ddot{z} - M_z\dot{z} - M_z z + (I_y - M_\theta)\ddot{\theta} - M_\theta\dot{\theta} - M_\theta\theta = M_w e^{-iw_e t} \quad (3)$$

Shuford(1957) 등의 실험적 연구를 참고하여 선체 길이 방향의 각 단면 부가 질량 분포 및 cross flow 저항 계수 분포를 얻은 후, 좌변의 유체력 미계수 추정식을 도출할 수 있으며 정리하면

식 (4)와 같다. (4)에서 적분 구간은 keel의 전체 침수 길이이다. s는 침수된 keel의 가장 앞쪽부터 keel을 따라 선미까지의 길이 좌표이며 a는 무게 중심의 s좌표 값이다.  $\mu$ 는 각 횡단면의 부가질량,  $\mu_s$ 는 선미 트랜섬에서의 횡단면 부가질량,  $\tau$ 는 정수 중에서 활주시의 트림각,  $\lambda$ 는 keel의 평균 침수 길이,  $\lambda_g$ 는 선미에서 무게중심까지의 길이,  $\phi(\lambda)$ 는 3차원 영향 계수이다. 각 변수의 '은 무차원화 값을 의미한다.

$$Z_z = -\phi(\lambda)\cos^2\tau \int \mu' ds', \quad Z_z = -2\phi(\lambda)\mu_s' \cos^3\tau,$$

$$Z_\theta = \phi(\lambda) \int \mu'(a-s') ds', \quad Z_\theta = -2\phi(\lambda)\mu_s' \lambda_g \cos^2\tau,$$

$$M_z = \phi(\lambda)\cos\tau \int \mu'(a-s')^2 ds',$$

$$M_z = 2\phi(\lambda)\cos^2\tau \left( \int \mu' ds' - \lambda_g \mu_s' \right),$$

$$M_\theta = -\phi(\lambda) \int \mu'(a-s')^2 ds',$$

$$M_\theta = -2\phi(\lambda)\cos\tau [\mu_s' \lambda_g^2 + \int \mu'(a-s') ds'] \quad (4)$$

우변의 파 강제력 및 파 강제 모멘트 항은 식 (5), (6)과 같이 각 성분들의 합으로 표현할 수 있다. 각 성분들의 의미는 Table 1에 나타내었다.

$$Z_w e^{-iw_e t} = -[F_1 + F_2 + F_3 + F_p + F_h] \cos\tau \quad (5)$$

$$M_w e^{-iw_e t} = M_1 + M_2 + M_3 + M_p + M_h \quad (6)$$

Table 1 Physical meanings of the wave force and moment components

Components	Physical meaning
$F_1, M_1$	Components related to wave elevation
$F_2, M_2$	Components related to wave orbital velocity
$F_3, M_3$	Components related to wave orbital acceleration
$F_p, M_p$	Froude-Krylov components
$F_h, M_h$	Effects of change of the wetted length of keel by wave elevation

활주선이 파 중에서 받는 동유체력은 같은 항주 조건에서 정수 중의 정상(steady) 상태일 때 받는 중력, 양력, 마찰력, 부력 등의 일정한 힘과, 파에 의한 시간 변화력으로 분류할 수 있다. 정상 상태의 힘들은 활주선의 항주 자세를 결정하게 되며 이를 기준으로 파에 의한 시간 변화력에 의해 주기적인 운동을 한다. 시간에 따라 변화하는 힘에는 활주선의 운동량에 대한 시간 변화율( $F_d$ )과 파에 의한 압력 성분( $F_p$ )이 있다. 또한 정수 중에서도 비교할 때 활주선이 침수되는 평균 면적이 변화( $F_h$ )하므로 이에 대한 고려도 필요하다. 활주선의 keel에 수직한 파의 오비탈 속도를  $\dot{\zeta}$ , keel의 전체 침수 길이를  $l_k$ 라고 하면  $F_d$ 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$F_d = \phi(\lambda) \int_0^{l_k} \frac{d}{dt} (\mu \dot{\zeta}) ds = \phi(\lambda) \int_0^{l_k} (\dot{\zeta} \frac{d\mu}{dt} + \mu \frac{d\dot{\zeta}}{dt}) ds \quad (7)$$

식 (7)을 전개하면 각각 파의 변위, 속도, 가속도에 관련된  $F_1, F_2, F_5$  항들을 얻을 수 있다. 마찬가지로 무게 중심을 기준으로 각 단면의 힘들에 의한 모멘트를 계산하여 모두 더하면  $M_1, M_2, M_5$ 를 계산할 수 있다. 파에 의한 압력 성분 중 선형 항  $F_p$ 는 식 (8)처럼 나타낼 수 있다.

$$F_p = \int_0^{l_k} \rho \left( \frac{d\phi_w}{dt} \right) ds \quad (8)$$

활주선이 정수 중에서 받는 정상 상태의 동유체력을  $F_{DS}$ , 파에 의한 keel의 평균 침수 길이 변화를  $\Delta\lambda$ 라고 할 때 keel의 평균 침수 길이 변화에 의한 힘  $F_h$ 는 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_h = \frac{\partial F_{DS}}{\partial \lambda} \Delta\lambda \quad (9)$$

무게 중심을 기준으로  $F_p$ 의 각 단면 성분들에 의한 모멘트를 모두 더하면  $M_p$ 를 얻을 수 있으며,  $M_h$ 는  $F_h$ 와 같은 방식으로  $\lambda$ 에 대한  $M_{DS}$ 의 변화율과  $\Delta\lambda$ 의 곱으로 구한다.

활주선의 상하 동요 및 종동요를 규칙파의 조우 주파수와 같은 주파수를 갖는 주기 운동 형태로

연직면 운동 방정식에 대입하고 두 식을 연립하여 풀면 상하동요 및 종동요의 운동 진폭과 위상차를 구할 수 있다.

### 4. 실험의 개요

#### 4.1 실험 장치

모형 시험은 서울대학교 선형 시험 수조의 고속 전차를 이용하여 실시하였다. 단, 선미파 시험의 경우 전차가 역방향으로 진행해야 하므로 전·후진 속도가 최대 5m/s인 기존의 예인전차를 이용하였다. 규칙파는 서울대학교 선형 시험 수조의 플랩형 조파기를 통해 생성하였다. Fig. 4는 고속전차의 사진 및 개념도이며 Fig. 5는 연직면 운동 계측 장치의 개념도이다.

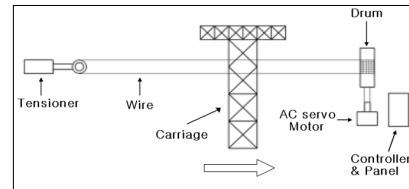


Fig. 4 Schematic view of high speed towing carriage

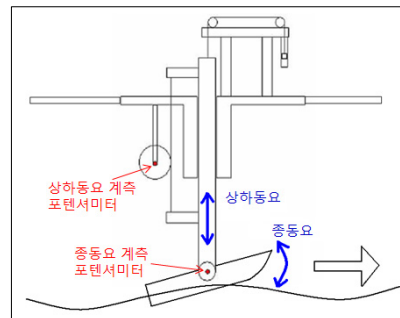


Fig. 5 Schematic view of vertical motion measurement

모형선의 종동요 중심 위치에서 규칙파의 파고를 계측할 수 있도록 파고계를 장착하였다. 선체에 의해 교란된 파가 계측되지 않도록 선체와 충분한 간격을 두고 파고계를 설치하였다. 전차 이

동 시 접촉식 파고계는 간섭 및 자체 변형 등으로 파고 계측에 무리가 있기 때문에 비접촉식 파고계를 사용하였다. 100Hz의 초음파가 매 회 반사되어 돌아오는 시간을 통해 전차로부터 수면까지의 상대 거리 변화를 계측할 수 있으며 사용 거리 범위는 0.2-1.5m이다.

조파기는 독립적으로 구동되며, 운동 계측 장치와 파고계의 신호는 하나의 계측 프로그램으로 동기화하여 입력 받아 처리하였다.

4.2 모형선

대상 활주선은 35노트급 고속 경비정으로 1/35 축소 모형이고, 하드차인을 가진 선형이다. 모형선 초기 설계 단계에서의 정면선도와 주요 제원은 Fig. 6 및 Table 2와 같다. 선저경사각은 선미에서 20°이고 선체중앙부에서는 23°이다. Table 2에서 LCG는 선미 트랜섬으로부터 무게 중심까지의 거리이다.

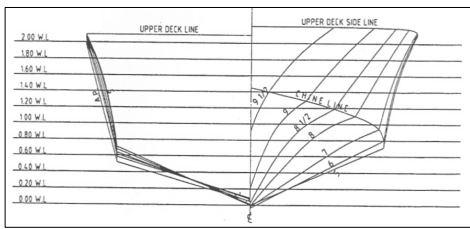


Fig. 6 Body plan of planing boat

Table 2 Principal particulars of planing boat

LOA [m]	0.523
LWL [m]	0.497
Breadth [m]	0.131
Displacement vol. [m <sup>3</sup> ]	6.69 × 10 <sup>-4</sup>
LCG [m]	0.2
Draft [m]	0.026

단, 실제 모형 시험 시에는 예인 장치를 모형선 내부에 추가 고정시키는 과정에서 하중이 0.75kgf로 증가하였으며 무게 중심은 선미에서 0.2m 떨어진 지점으로 초기 설계 상태와 같다.

4.3 실험 조건

Table 3 Test conditions

incident angle [deg]	Froude No.	Wave frequency [rad/s]	Encounter frequency [rad/s]	Velocity region
0 (following)	0.4	4.030	2.540	I
		6.870	2.540	II
	0.5	3.588	2.105	I
		5.094	2.105	II
		6.412	1.675	II
		2.618	1.675	I
	0.6	4.648	1.675	II
		8.670	1.675	III
		6.762	1.675	III
	1.0	7.025	4.343	III
7.915		6.515	III	
8.686		8.687	III	
180 (heading)	1.0	2.684	4.343	
		3.573	6.515	
		4.342	8.687	

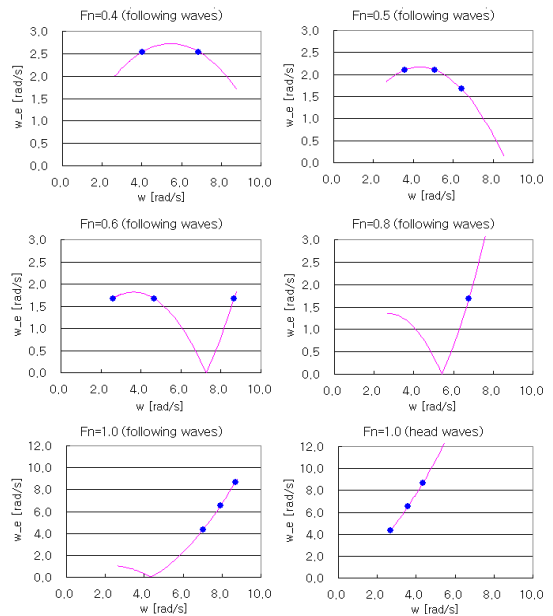


Fig. 7 Wave frequency and corresponding encounter frequency on the tests

본 연구에서는 규칙파의 파 진폭은 15mm로 고정하고, 규칙파의 입사각과 주파수, 그리고 모형선의 Froude수 등을 변화시키면서 모형 시험을 수행하였다. 실험 조건을 정리하면 Table 3과 같다. 비교를 위해 파주파수와 조우주파수를 함께 표기하였다. 또한 선미파의 경우 2.2절에서와 같이 속도 영역이 세 가지로 분류되는데 해당되는 속도 영역을 표에 실었다.

조파기에서 실제로 생성할 수 있는 파의 파장은 0.8~9.0m 정도이다. Fig. 7은 0.8~9.0m 파장 범위에서 각 Froude수에 따른 조우주파수와 파주파수 관련 그래프이다. 그래프에서 각 실험 경우를 둥근 점들로 표시하였다.

**4.4 정수 중에서의 실험 결과**

실험 결과 분석을 위하여 우선 정수 중 대상 모형선의 부상량 및 트림각 예측 결과 예를 도시하면 Fig. 8, Fig. 9와 같다(Kim et al. 2009(a)).

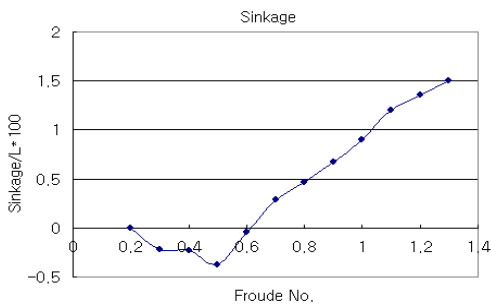


Fig. 8 Sinkage

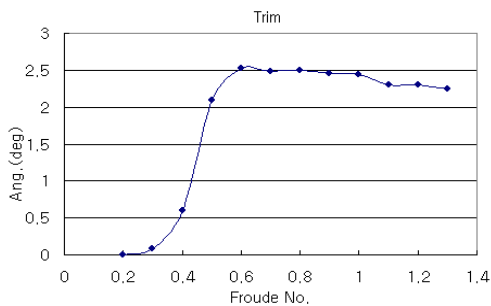


Fig. 9 Trim angle

부상량은 모형선 전장으로 무차원화 하였다. 하중은 0.75kgf, 무게 중심은 선미로부터 선체 길이 방향으로 0.2m 지점에 위치할 경우이다. 이하의 모형 시험 및 이론 계산에서도 하중과 무게 중심 위치 조건을 위와 같이 고정한다.

**5. 결과 분석 및 고찰**

**5.1 실험 결과**

Table 3과 같은 조건에서 모형 시험을 실시하고 상하동요 및 종동요의 진폭 및 위상차를 예측하였다. 식 (10)처럼 규칙파의 파고  $\eta$ 를 사인함수로 표현할 수 있으며, 상하동요 변위  $z$ 와 종동요 각변위  $\theta$ 도 각각 일정한 진폭과 위상을 갖는 사인함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta(t) &= A \sin(w_e t) \\ z(t) &= Z \sin(w_e t - \alpha_z) \\ \theta(t) &= \Theta \sin(w_e t - \alpha_\theta) \end{aligned} \tag{10}$$

실험 결과를 정리하면 Table 4, Table 5와 같다. 등속 구간에서 상하동요 및 종동요 운동을 다섯 주기 이상 예측하고 진폭 및 위상의 평균을 취하여 각 시험의 대표값들을 구하였다. 표에는 평균과 표준편차를 함께 기입하였다. 상하동요 진폭은 파 진폭으로 무차원화 하였고, 종동요 진폭은 파의 기울기로 무차원화 하였다. 파고의 최대값이 예측된 이후에 운동의 최대값이 예측되면 위상뒤섬(phase lag)으로 양의 위상각이고, 운동의 최대값이 파고의 최대값 이전에 예측되면 위상앞섬(phase lead)으로 음의 위상각을 갖는다.

Table 4에서 상하동요는 파 진폭, 즉 일정한 상수로 무차원화 하였기 때문에 차원화해도 대소 관계가 같지만, Table 5의 종동요는 파 기울기로 무차원화 하였고 각 실험에서의 파 기울기가 모두 다르므로 차원화하면 정량적인 대소 관계가 바뀔 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 상하동요 및 종동요의 무차원화 결과와 실제 예측 값의 비교 그래프이다.

Table 4 Test results of heaving motion

Incident angle [deg]	Fn	$\omega_e$ [rad/s]	$Z/A$		$\alpha_z$ [deg]	
			mean	standard deviation	mean	standard deviation
0	0.4	2.540	0.74	0.09	21.96	1.02
		2.540	0.62	0.02	16.43	0.42
	0.5	2.105	0.75	0.05	8.18	0.89
		2.105	0.70	0.01	18.00	1.46
	0.6	1.675	0.60	0.02	19.08	0.87
		1.675	0.84	0.08	6.01	0.44
	0.8	1.675	0.70	0.06	9.54	0.23
		1.675	0.42	0.06	6.23	0.78
	1.0	4.343	0.71	0.01	-4.61	0.95
		6.515	0.85	0.07	-12.50	1.30
8.687		0.88	0.08	13.11	0.70	
180	1.0	4.343	1.04	0.07	-3.55	0.25
		6.515	1.17	0.02	-7.62	0.63
		8.687	1.33	0.03	6.67	0.71

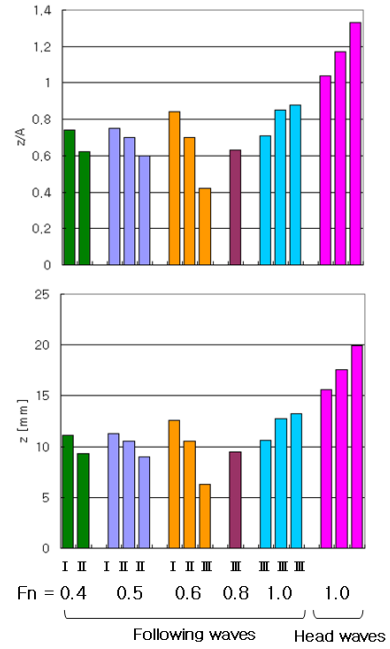


Fig. 10 Non-dimensionalized amp.(upper) and dimensional amp.(lower) of heaving motion

Table 5 Test results of pitching motion

Incident angle [deg]	Fn	$\omega_e$ [rad/s]	$\theta/kA$		$\alpha_\theta$ [deg]	
			mean	standard deviation	mean	standard deviation
0	0.4	2.540	0.55	0.05	111.72	2.38
		2.540	0.72	0.02	90.49	5.97
	0.5	2.105	0.67	0.05	95.93	0.28
		2.105	0.76	0.01	91.03	2.28
	0.6	1.675	0.71	0.01	78.00	0.22
		1.675	0.81	0.04	78.90	2.41
	0.8	1.675	0.82	0.08	76.04	4.12
		1.675	0.64	0.06	-69.84	0.01
	1.0	4.343	0.87	0.07	-57.44	3.29
		4.343	0.89	0.02	-73.67	1.28
6.515		0.86	0.06	-74.38	3.41	
180	1.0	8.687	0.78	0.08	-66.41	2.94
		4.343	2.34	0.15	-111.72	2.60
		6.515	2.38	0.04	-88.14	1.75
		8.687	2.64	0.03	-87.50	3.89

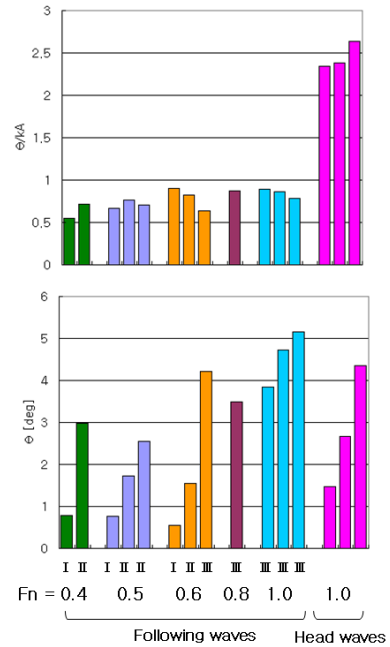


Fig. 11 Non-dimensionalized amp.(upper) and dimensional amp.(lower) of pitching motion

5.2 중동요의 위상에 대한 고찰

모든 선미 규칙파 중 실험에서 파 진폭에 대한 모형선의 중동요 위상각을 그래프로 정리하면 Fig. 12와 같다.

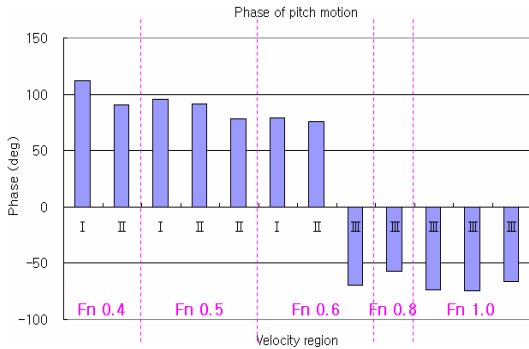


Fig. 12 Phase of pitch motion in following waves

Fig. 12에 의하면 중동요의 위상각은 I, II 영역에서는 대체적으로 70~90° 부근이며, III 영역은 이와 절대값은 비슷하고 부호는 반대이다. 즉 I, II 영역은 위상뒤섬이고 III 영역은 위상앞섬이다.

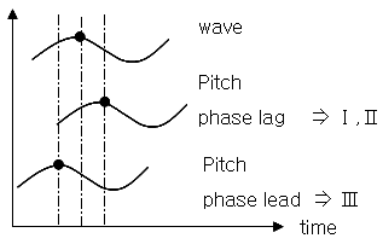


Fig. 13 Phase of pitching motion (phase lead/phase lag)

시간에 대한 파고 및 중동요 그래프를 간략히 나타내면 Fig. 13과 같다. 모형선 운동이 파보다 느리면 위상뒤섬, 빠르면 위상앞섬이다. 파고 및 모형선 운동 계측은 모두 모형선의 중동요 중심 위치에서 상대적으로 이루어지므로, 파면의 각 위치에서 같은 자세를 갖더라도 파가 모형선보다 빠르면 위상뒤섬, 모형선이 파보다 빠르면 위상앞섬으로 계측되고 이 때 두 위상각의 절대값은 같다.

5.3 속도 영역에 따른 운동 응답 비교

Froude수가 0.6으로 일정하고 조우주파수가 1.675rad/s일 때 파의 시간 변화 그래프는 Fig. 14와 같다. 별모양 점은 세 가지 속도 영역 각각의 경우 모형선 중동요 중심 위치에서 파를 계측한 결과로 조우주파수가 같기 때문에 일치한다. 실선, 가는 점선, 굵은 점선은 각각 I, II, III 영역의 실험에서 실제 생성한 파의 시간 그래프이다.

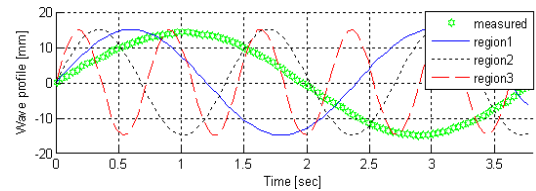


Fig. 14 Wave profiles ( I, II, III region at Fn=0.6)

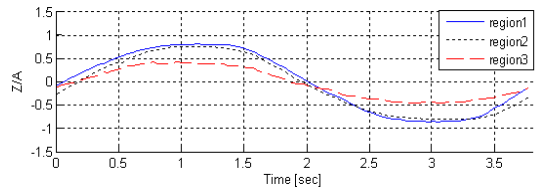


Fig. 15 Time histories of heaving motion ( I, II, III region at Fn=0.6)

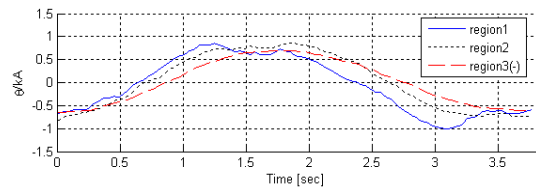


Fig. 16 Time histories of pitching motion ( I, II, III region at Fn=0.6)

I, II, III 영역에 대해 상하 동요 및 중동요의 시간에 대한 그래프는 Fig. 15 및 Fig. 16과 같다. 역시 실선이 I 영역의 결과이고, 가는 점선, 굵은 점선이 각각 II, III 영역에서의 운동 계측 값이다. 단, 5.2절에 언급한 바와 같이 각 속도 영역마다 파면의 일정한 위치에서 포착할 때 중동요 변위가 같은 경우라도 실제 계측이 모형선 중심으로 이루어



어지기 때문에 파가 모형선보다 빠른 경우와 모형선이 파보다 빠른 경우 파에 대한 종동요 위상의 상대적인 부호는 반대이다. 따라서 Fig. 16에서 I, II 영역의 종동요와 비교가 쉽도록 III 영역 종동요 부호를 반대로 나타내었다.

Froude수 0.6일 때 상하동요의 무차원화 진폭의 크기는 I>II>III 순서이고, 위상각은 10°이내로 거의 같다. 종동요의 무차원화 된 진폭은 I영역과 II영역에서 거의 같으며 III 영역에서 가장 작다. 위상은 I, II 영역에서 거의 같은 양이고, III영역에서는 I, II영역일 경우와 절대값은 비슷하나 부호가 음이다.

5.4 Froude 수에 따른 운동 응답 비교

동일한 속도 영역과 조우주파수 상태에서 Froude 수가 다를 경우 고속선의 운동 응답을 비교하였다. II영역에서 조우주파수가 1.675rad/s일 때 Froude 수 0.5와 0.6에 대하여 무차원화 된 상하동요 및 종동요 진폭의 차이는 Fig. 17과 같다. 또한 III영역에서 같은 조우주파수에 대해 Froude 수 0.6과 0.8일 때 무차원 상하동요 및 종동요 진폭 차이는 Fig. 18과 같다.

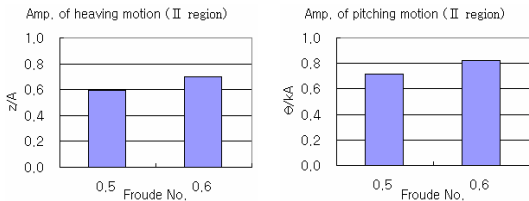


Fig. 17 Amplitude of motion at Fn=0.5/0.6 (II region,  $w_e = 1.675\text{rad/s}$ )

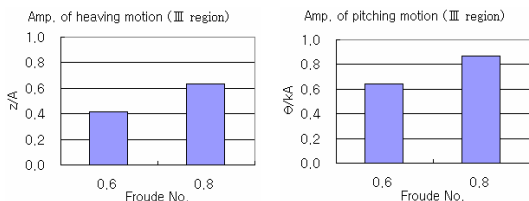


Fig. 18 Amplitude of motion at Fn=0.6/0.8 (III region,  $w_e = 1.675\text{rad/s}$ )

Fig. 17과 Fig. 18에 의하면 II, III 영역에서는 같은 조우주파수에 대해 Froude 수가 높을수록 운동 진폭이 크다는 것을 알 수 있다. Froude 수가 높을수록 선체와 파 입자의 상대 속도가 커지기 때문으로 추정된다. 한편 Table 4, Table 5에서도 확인할 수 있듯이 파에 대한 모형선 운동의 위상각은 Froude 수의 변화에 큰 영향을 받지 않는다.

5.5 선미파와 선수파 중의 운동 응답 비교

Fig. 19, Fig. 20은 Froude 수 1.0일 때 동일한 세 가지 조우주파수 4.343, 6.515, 8.687rad/s에 대해 선수파, 선미파 중에서의 무차원 상하동요와 종동요의 운동 진폭 및 위상각을 비교한 그래프이다. 단, 선미파는 모두 속도 영역 III인 경우이다. 상하동요와 종동요 모두 선수파일 경우가 선미파일 경우보다 진폭이 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 조우주파수가 같더라도 선미파에 비해 선수파일 때 선체에 대한 파 입자의 상대 속도, 가속도가 더 크기 때문으로 추정된다.

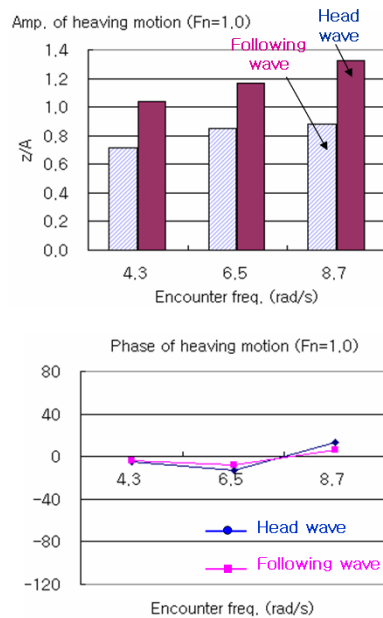


Fig. 19 Amplitude and phase of heaving motion at Fn=1.0

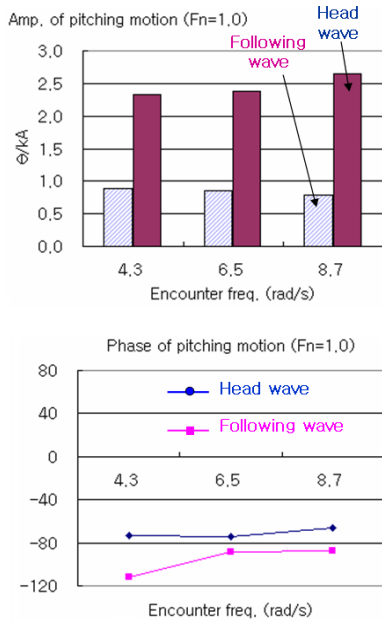


Fig. 20 Amplitude and phase of pitching motion at  $Fn=1.0$

상하동요와 종동요의 위상각은 선수파와 선미파에서 큰 차이가 없다. 선수파일 경우도 선미파의 III 영역처럼 파에 대한 종동요 위상각이 음의 값, 즉 위상앞섬인 것을 알 수 있다.

5.6 선미파 중 결과와 정수 중 결과 비교

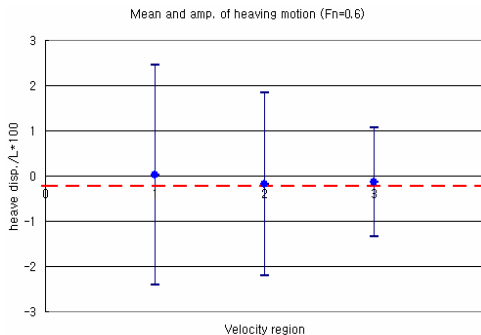


Fig. 21 Mean & amplitude of heaving motion ( $Fn=0.6$ , following waves)

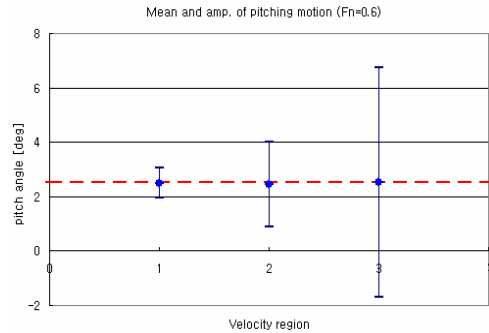


Fig. 22 Mean & amplitude of pitching motion ( $Fn=0.6$ , following waves)

Fig. 21, Fig. 22는 Frou데수가 0.6, 조우주파수는 1.675rad/s일 경우 선미파의 속도 영역 I, II, III 에서의 상하동요, 종동요의 평균을 정수 중에서의 부상량, 트림각과 비교한 것이다. 비교를 위해 상하동요 진폭은 모형선의 전장으로 무차원화 되었고, 종동요 각 변위는 실제 계측 값이다.

각 그래프의 점선은 정수 중에서의 부상량 및 트림각이며 세로 실선의 상한 및 하한은 각각 운동의 진폭이고 그 중간이 평균값이다. 선미파 중에서의 운동 평균이 정수 중에서의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 다른 선미파 중 실험 결과 역시 동일한 Frou데 수로 실험한 정수 중에서의 결과와 평균값이 잘 일치하였다.

5.7 실험 결과와 계산 결과의 비교

실험을 수행한 모형선을 대상으로 이론적 계산을 실시한 후 실험 결과와 비교하였다. Fig. 23은 선미 규칙파 중에서 Frou데수 0.6일 경우 I, II, III 영역에 대한 고속선 운동 계산 및 실험 결과이다. 종동요의 경우 I, II영역에서 계산 결과가 과도하게 추정되고 있다.

Fig. 24는 선미 규칙파 중 Frou데수 1.0일 때 계산 및 실험 결과의 비교 그래프이다. 세 가지 규칙파 모두 III 영역이다. 종동요는 실험과 계산 결과가 거의 일치하나, 상하동요의 경우 전반적으로 계산에 의한 결과가 실험값보다 크다.

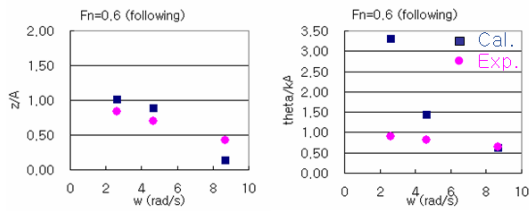


Fig. 23 Calculation and experimental results ( $F_n=0.6$ , following waves)

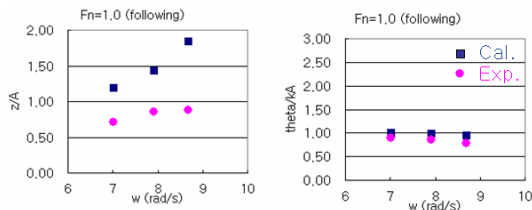


Fig. 24 Calculation and experimental results ( $F_n=1.0$ , following waves)

Fig. 23 및 Fig. 24에서 실험 결과에 비해 일부 이론 결과가 과도하게 추정되는 것은 이론식에서 선체에 대한 파 입자의 상대 운동을 수식화 할 때의 오차 때문으로 판단된다.

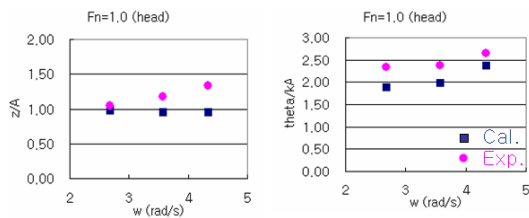


Fig. 25 Calculation and experimental results ( $F_n=1.0$ , head waves)

Froude수는 1.0이고, 선수 규칙파 중에서의 실험 및 계산 결과를 Fig. 25에 정리하였다. 상하동요와 종동요 모두 실험값과 이론값 사이에 약간의 차이는 있으나 정량적으로 유사하며 경향도 거의 같다. Martin(1976)의 고속선 운동에 관한 이론 계산법은 선수파에 대해 정도 높은 결과를 주며, 선미파에 대한 계산 방법은 더 정밀한 검토가 필요할 것으로 보인다.

### 6. 결론

본 연구에서는 선미 규칙파 중 활주선의 모형 시험을 실시하여 연직면 운동, 즉 상하동요와 종동요 운동 응답을 예측하고 결과를 분석하였다.

선미파의 경우 낮은 조우주파수일 때 최대 세 개의 파주파수가 대응되는데 각 속도 영역을 분류하여 운동 응답을 비교하였다. 파가 선박보다 빠른 I, II 영역에서는 종동요가 위상뒤섬이며, 선박이 파보다 빠른 III 영역에서는 종동요가 위상앞섬이다.

동일한 조우주파수일 때 무차원 상하동요의 진폭은 I>II>III 영역 순서로 크며, 무차원 종동요 진폭은 I 영역에서가 II 영역에서보다 작거나 비슷하고, III 영역에서 가장 작다. 같은 조우주파수에 대해 II, III 영역에서는 Froude 수가 높을수록 운동 진폭이 크고, 위상은 큰 차이가 없다.

Froude 수 1.0인 경우 동일한 조우주파수에 대해 선미파보다 선수파 중에서 무차원 운동 진폭이 더 크다. 선수파 중 역시 선미파 III영역처럼 상하동요는 파와 위상차가 거의 없고, 종동요는 파에 대해 위상앞섬이다.

선미파 중의 운동 평균을 같은 Froude 수로 정수 중에서 실험했을 경우의 부상량, 트림각과 비교하면 거의 일치한다. 그리고 선수파 중에서는 이론적 계산 결과가 실험 결과와 유사하지만 선미파 중에서는 두 결과가 상당한 차이를 보였다.

추후에 다양한 입사파에서 고속선의 운동을 계산할 수 있는 이론적 방법을 정립할 필요가 있으며, 고속선의 수평면 운동에 대한 실험 및 이론적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 후 기

본 연구의 일부는 서울대학교 BK21 해양기술인력양성사업단 및 해양시스템공학연구소(RIMSE)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- Baek, K.H., 1986, An analysis of the Stability

and the Motion Responses of a Planing Craft, M.D. Thesis, Seoul National University.

- Hamamoto, M., 1985, "Transverse Stability of a Ship in Following Sea," Journal of the Kansai Society of Naval Architects of Japan, Vol. 185.
- Kerwin, J.E., 1955, "Note on Rolling in Longitudinal Waves," International Shipbuilding Progress, Vol. 2, No. 16.
- Kim, D.J., Rhee, K.P., and Park, H.S., 2009, "A Study on the Effects of Weight and Center of Gravity of a Planing Craft on Running Attitude," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 3.
- Kim, D.J., Hwang, S.H., Park, H.S., and Rhee, K.P., 2009, "An Experimental Study on the Motion Response of a High-Speed Planing Craft in Regular Head Waves," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 4.
- Martin, M., 1976, Theoretical Prediction of Motions of High-Speed Planing Boats in Waves, DTNSRDC Report 76-0069.
- Paulling, J.R., 1961, "The Transverse Stability of a Ship in Following Seaway," Journal of Ship Research, Vol. 4.
- Shigehiro, R., 1993, "A Study on Motion Characteristics of a Hybrid High-Speed Catamaran in Longitudinal Waves," Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol. 86, pp. 87-97.
- Shirazawa, H., and Ikeda, Y., 1996, "A Study on Evaluation of Seakeeping Performance for Passenger Ships," Journal of the Kansai Society of Naval Architects of Japan, Vol. 226, pp. 117-126.

- Son, K.H., and Kim, J.A., 1984, "Wave Exciting Forces Acting on Ships in Following Seas," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 21, No. 3, pp. 27-34.
- Son, K.H., and Yun, S.D., 1989, "A Study on Transverse Stability of Ships in Following Seas," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 26, No. 1, pp. 1-10.
- Son, K.H., 1995, "Manoeuvrability of High-Speed Ships in Waves," Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 32, No. 1, pp. 36-39.
- Shuford, C.L., 1957, A Theoretical and Experimental Study of Planing Surfaces Including Effects of Cross Section and Plan Form, NACA Report 820.



< 김 동 진 >



< 이 기 표 >



< 유 영 준 >



< 박 한 솔 >